

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE
FACULTAD DE CIENCIAS MATEMATICAS**

**CONSEJO SUPERIOR
DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS**

INSTITUTO DE ASTRONOMIA Y GEODESIA

(Centro Mixto C.S.I.C. - U.C.M.). MADRID

Publicación núm. 194

ASTRONOMIA: HISTORIA Y CALENDARIO

por

C. de Toro y Llaca



MADRID

1999

ASTRONOMÍA: HISTORIA Y CALENDARIO

I

LA EVOLUCIÓN DE LOS CONOCIMIENTOS
ASTRONÓMICOS A TRAVÉS DE LA HISTORIA

II

EL CALENDARIO ACTUAL EN OCCIDENTE
Y SUS ORÍGENES

C. de Toro y Llaca

Instituto de Astronomía y Geodesia (CSIC-UCM)

Facultad de Ciencias Matemáticas

Universidad Complutense de Madrid

ÍNDICE

I. EVOLUCIÓN DE LOS CONOCIMIENTOS ASTRONÓMICOS A TRAVÉS DE LA HISTORIA

1. Hipótesis primitivas	1
2. Los períodos Clásico y Helenístico de la ciencia griega	13
3. La época de la oscuridad, Bizancio y la ciencia árabe	19
4. La obra astronómica de Alfonso X el Sabio	23
5. La Revolución Copernicana	25
6. La Edad de Oro de la astronomía de posición	28
7. La astronomía en el siglo XVIII. Nacimiento de la geodesia como ciencia independiente	31
8. Siglos XIX y XX. Nacimiento y desarrollo de la astrofísica	36
9. La astronomía en la época actual	48
Bibliografía	55

II. EL CALENDARIO ACTUAL EN OCCIDENTE Y SUS ORÍGENES

1. Introducción	59
2. Calendarios primitivos	61
3. Los antiguos pueblos de la Cuenca del Mediterráneo	66
4. Calendarios medievales	73
5. El calendario actual en Occidente	77
6. Fecha Juliana	82
Bibliografía	84

LA EVOLUCIÓN DE LOS CONOCIMIENTOS ASTRONÓMICOS A TRAVÉS DE LA HISTORIA

C. de Toro y Llaca

Instituto de Astronomía y Geodesia (CSIC-UCM)

Facultad de Ciencias Matemáticas

Universidad Complutense de Madrid

1. HIPÓTESIS PRIMITIVAS

El interés por la Tierra, el Sol, la Luna y las estrellas se remonta a las primeras fases de la evolución humana. Sin embargo, si entendemos como investigación científica la proposición de hipótesis que expliquen los fenómenos naturales, la construcción de modelos y su contrastación con la evidencia empírica, debemos situar el alba de las investigaciones astronómicas en el Neolítico (9000-3000 a.C.), época en la que se inicia el florecimiento de grandes culturas. Este desarrollo fue favorecido por las condiciones climáticas, ya que la desertización de amplias zonas, como consecuencia de un cambio climático global, determinó el agrupamiento de la población nómada en torno a zonas fértiles. En ellas, las aldeas agrícolas y ganaderas, inicialmente autosuficientes, evolucionarán hacia sociedades más complejas, dando paso en torno al 6000 a.C. a organizaciones sociales jerarquizadas y estratificadas. Como determinantes de la formación de estas civilizaciones, suelen considerarse:

Los ríos Tigris y Eufrates, donde se desarrolla la cultura de Hassuna (5900-5600 a.C.), formada por los primeros asentamientos en la cuenca alta del Eufrates. Pronto se extenderán a las fértiles llanuras aluviales del sur de Mesopotamia. En esta región, sus habitantes, denominados sumerios, se unirán posteriormente a los acadios y a otros pueblos, dando lugar a la cultura babilónica en el siglo XVIII a.C., al convertirse la ciudad de Bal-ilani en la capital política del territorio ocupado por Sumer y Akkad.

El río Nilo, cuyas periódicas crecidas determinaron el establecimiento y las características de la civilización egipcia, como conse-

cuencia de la reunificación de tribus paleolíticas ante la gradual transformación de amplias regiones del norte de Africa en arenosos desiertos, que alcanzaría su máximo en el año 6000 antes de nuestra era.

El río Indo, cuna de la cultura protohindú, donde se establecen y evolucionan hacia sociedades más complejas los pueblos del noroeste de la India, que culminarán en la civilización de Harappa a mediados del tercer milenio. La posterior invasión de los arios védicos, en torno al 1500 a.C., transformaría sustancialmente su concepción del mundo.

El río Huang-ho, en cuyas terrazas se han encontrado restos arqueológicos de primitivos asentamientos que se remontan al 6000 a.C. Caracterizados en una primera fase por un desarrollo interno y autóctono, son considerados el origen de la legendaria civilización china.

América Central, donde se conformaron las culturas azteca y maya, y el **Altiplano Andino** con la cultura de Nazca y los incas. El estudio de los yacimientos escavados parece evidenciar que en el continente americano surgen grandes culturas autóctonas en épocas muy posteriores a las de Eurasia: en el 2100 a.C. en la región andina y en el 1500 a.C. en Mesoamérica. Podría ser la consecuencia de una lenta evolución inicial, marcada por un patrón de asentamiento estacional que se remonta al 8700 a.C.

Tras un proceso de adaptación al régimen sedentario, los pobladores de estas seis regiones desarrollan de forma individualizada las primeras ideas científicas acerca del mundo. En general son de tipo especulativo y, en algunos casos, simples fantasías de carácter simbólico. Así, por ejemplo, en la cultura protohindú, el mundo, reducido a un hemisferio, se apoya sobre cuatro elefantes y estos, a su vez, sobre una tortuga que flota en el océano universal. Describen como "... en el centro del Universo existe una montaña, *el Meru*, que tiene por eje el de los polos". A su alrededor se disponen siete zonas concéntricas, de las cuales la interior está dividida en cuatro continentes, que ocupan los cuatro puntos cardinales. Una de estas regiones es el continente *Bharata*, la India, para el

cual la cumbre del Meru es el norte. Alrededor de este mundo terrestre gravitan los astros. En principio parece una simple fantasía, pero la perspectiva cambia cuando lo analizamos. En primer lugar, la India se extiende al sur del Himalaya, lo que condiciona su idea del mundo. Pero destaca, además, en épocas tan remotas, el concepto de polos, eje del mundo, puntos cardinales y rotación de la esfera celeste alrededor de un punto situado al norte. También es interesante tener en cuenta que, aunque en la cultura protohindú existe un solo hemisferio, años más tarde aparecen referencias a un hemisferio sur donde habitan los *Asura*, antagonistas ancestrales de los dioses que residen en la cumbre del Meru. Puede considerarse una primera idea de un mundo esférico.

Es curioso encontrar teorías cosmogónicas casi idénticas en puntos muy alejados del planeta. Así, en las culturas mesoamericanas la Tierra es un disco que se apoya en cuatro cocodrilos que nadan en el océano, mientras que el cielo, donde viven el Sol, la Luna y las estrellas, representados por divinidades, tiene su base en cuatro columnas de diferentes colores, situadas en las direcciones de los puntos cardinales.

Junto a estas ideas de carácter simbólico, desarrollan, y es un punto de gran importancia para la posterior evolución del conocimiento humano, una descripción exacta de los fenómenos celestes basada en la observación, que dio lugar al nacimiento y desarrollo de la astronomía. En todas las grandes culturas orientales contemporáneas se conoce el movimiento del Sol y de la Luna, que dará lugar a la formación de los calendarios lunisulares, cinco planetas, diferenciándolos por su movimiento no circular del resto de los astros, y los períodos de repetición de las configuraciones astronómicas que estos siete astros errantes determinan. Sin embargo, en su intento por comprender el mundo que les rodea, atribuyen a estas realidades observadas intrincadas leyes naturales, regidas por los dioses, como resultado de la interpretación y extrapolación a la región celeste de su limitado conocimiento físico del Universo. Así, en el sistema del mundo de los vedas, cuya vida está gobernada por el régimen de los monzones, se explica el desplazamiento de cinco astros errantes, denominados *Sabio*, *Blanco*, *Tizón*, *Señor de la Oración* y *Lento*, mediante la acción cósmica de cuerdas de viento.

Un hecho significativo es que todas las culturas antes nombradas, si exceptuamos las mesoamericanas y las andinas, comienzan a transmitir los conocimientos geométricos a partir del año 5000 a.C. Teniendo en

cuenta que estos estados primarios surgen a partir de un desarrollo interno e independiente y que no puede considerarse una única pauta evolutiva, podemos pensar que el progreso inicial de estas sociedades fue casi simultáneo.



Fig. 1. Zigurat de la ciudad de Ur, construido a finales del III milenio.

Puede considerarse que **los sumerios** son la primera civilización del mundo y no simplemente una cultura, al contar en el 5000 a.C. con una compleja organización social, política y religiosa. Su mayor aportación, junto con la invención de la escritura, es la construcción de un sistema de numeración no decimal, que tomaba como base primero el 12 y, más tarde, el 60. Mientras que el resto de las culturas orientales tomaba únicamente como base el número 10, relacionado con los dedos de la mano, los sumerios consideraron la ventaja matemática de tomar como base un número divisible por muchos otros sin resto. Otra característica original, que no se encuentra en ningún otro sistema antiguo, es una numeración posicional, en la que el valor de un signo numérico depende

de su posición relativa en el seno del número escrito. Esta notación tiene la inmensa ventaja de simplificar las operaciones fundamentales y de poder expresar fácilmente tanto cantidades muy grandes como muy pequeñas. Reservan el sistema posicional de base 60 para los textos matemáticos y astronómicos, conservando una numeración decimal fundada en un principio aditivo de yuxtaposición en la vida cotidiana. Realizan, además, la división del círculo en 360 grados, formados por sesenta minutos de sesenta segundos de arco, no utilizada por las civilizaciones orientales contemporáneas, que sería introducida en Grecia por Hiparco de Rodas en el siglo II antes de nuestra era.

El gran desarrollo matemático alcanzado por este pueblo es consecuencia, probablemente, de su notable actividad catastral, arquitectónica e hidráulica. Queda patente en sus numerosas tablas numéricas, que proporcionan de forma inmediata el resultado de multiplicaciones, divisiones, inversos, cuadrados, raíces cuadradas, cubos y raíces cúbicas. Asimismo, existen tablillas que contienen series, relaciones exponenciales, problemas de geometría, con cálculos prácticos de superficies y volúmenes, y numerosos textos pedagógicos de matemáticas.

La utilización del sistema de numeración sexagesimal, su alto nivel de conocimientos matemáticos y la calidad de su cielo para las observaciones, al caracterizarse esta región por un clima seco y normalmente despejado, unidos a la influencia religiosa, contribuyeron notablemente al auge de la astronomía.

La cosmología sumeria, extraída de narraciones míticas llenas de imaginación y fantasía, que datan del 3000 a.C., trata de explicar el origen y naturaleza del Universo. Se presenta en forma de globo esférico, que se mantiene inmóvil y en equilibrio al estar inmerso en un océano cósmico infinito. La semiesfera superior forma el universo visible, denominado el *An-ki*, el cielo-tierra, mientras que en la inferior reside el infierno. La base del *An-ki* está constituida por un disco plano que flota horizontalmente en el mar, origen de todas las cosas. Sobre ella se cierra la bóveda del cielo, brillante y azul, donde se desplazan los astros. Entre ambas regiones se encuentra el *Lil*, cuyo significado parece ser aire o viento. De sus descripciones se desprende que, para ellos, los dioses guiaban y controlaban los cuatro elementos fundamentales (tierra, agua, aire y cielo), los cuerpos celestes, las entidades materiales y las fuerzas de la naturaleza. Aunque restos arqueológicos del período casita, en el

siglo XVII a.C., muestran ocho esferas concéntricas, de las cuales la interior está ocupada por la Luna, parece que este modelo, que trata de explicar el diferente desplazamiento de los "astros errantes", fue abandonado posteriormente, siendo sustituido por representaciones gráficas independientes de cada fenómeno astronómico y aproximaciones mediante funciones lineales.

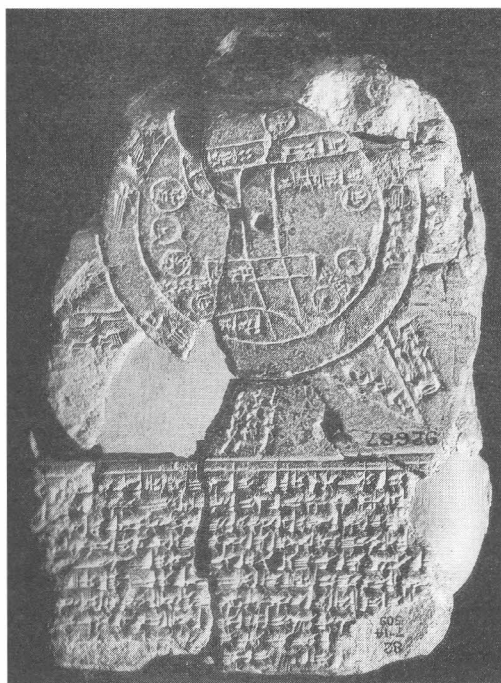


Fig. 2. Tablilla de la época neobabilónica (600 a.C.) representando su sistema del mundo: un disco plano que flota en el océano, sobre el que se cierra la bóveda celeste en forma de semiesfera.

Es de suponer que los primitivos sumerios se sintieron impresionados al observar desde sus zigurats el Sol, la Luna, los cinco planetas conocidos y las estrellas, que agruparon en constelaciones, moviéndose sobre la Tierra en círculos perfectos en torno a la estrella *Neviru*. Observan como las constelaciones se desplazan de oriente a occidente manteniendo invariables sus posiciones relativas. De la época de Hammurabi

(1792-1750 a.C.), se conserva un "manual de astronomía" en el que las estrellas aparecen agrupadas en categorías, a las que se asignan las principales características observadas. Restos arqueológicos más modernos, fechados en el siglo VI a.C., muestran, así mismo, diagramas representando las constelaciones. Esta agrupación de las estrellas de la noche en constelaciones se encuentra, también, en otras culturas coetáneas, posiblemente por su influencia, cambiando sólo la designación. Así, los egipcios las denominan Avestruz, Cabeza, Hipopótamo, Gigantes, Novilla, etc, y los chinos, pueblo de agricultores, Redes de Diques, Canales, Molinos, Heno, Ganado, Granjas, Látigo, Sandalia, etc. En oposición, la astronomía védica considera un zodíaco lunar al que corresponde un conjunto de 27 ó 28 constelaciones, según la época de los documentos.

Los habitantes del *País Entre Ríos* se dan cuenta de que las salidas y puestas del Sol, el dios *Utu* mensajero de los sueños, no se producen siempre sobre el mismo fondo de estrellas, sino a lo largo de una fina banda trazada a través de las 12 constelaciones que forman el zodíaco. Fue denominada eclíptica, al observar que sólo se producían eclipses cuando la Luna, el dios sabio *Nanna*, la cruzaba. La inclinación de la eclíptica, así como la fecha de solsticios y equinoccios, era determinada mediante el *polos*, instrumento de diseño mesopotámico predecesor de la "esfera armillar".

Cerca del río Eufrates se han descubierto tablillas cuneiformes de terracota, que datan del período Neobabilónico (626-539 a.C.), conteniendo cálculos precisos de eclipses lunares, práctica usual al menos desde el siglo XIII a.C., aunque se tiene constancia de que el seguimiento de estos fenómenos se realizó desde el Tercer Milenio antes de nuestra era. El método de predicción utilizado se basa en el período denominado Saros, ciclo de 223 lunaciones.

Cuando los pueblos de Mesopotamia observan la Luna se dan cuenta de dos hechos: recorre el zodíaco en 27 días y tiene un período de configuración de 30 días. Esto tiene para ellos una gran relevancia, ya que es el único astro que crece y mengua, desplazándose sobre el zodíaco en sentido contrario al de rotación de las estrellas. En la biblioteca de Assurbanipal se ha encontrado una sorprendente tabla de iluminaciones de la Luna. En ella, el disco es dividido en 240 secciones, dándose para cada día el número de sectores iluminados, que varía de 0 a 240 en los 15 días considerados. Además, se incluye un método de extrapolación

que permite predecir las fases. No es de extrañar, por lo tanto, que el dios Marduk, que marca y gobierna la duración de los períodos de tiempo, asigne como deidad rectora de este astro el Dios Sabio, reservando para su hijo Utu el Sol. En consecuencia, en la época arcaica, se considera un calendario lunar formado por 12 meses alternados de 29 y 30 días que se inician en la Luna Nueva Creciente; es decir, en el instante en el que puede verse por primera vez la luna nueva tras la puesta del Sol. Teniendo en cuenta que la duración de los meses lunares es variable, con un período medio de 29.53 días solares, esta configuración de 354 días



Fig. 3. Melishipak II presentando su hija a la diosa Inanna, el planeta Venus. Kudurru del siglo XII a.C.

constituye una buena aproximación del año lunar. Sin embargo, los astrónomos sumerios, capaces de determinar con gran precisión mediante el polos la duración del año trópico a partir de los instantes en que se producen equinoccios y solsticios, constatan que existe cada vez una mayor separación entre el calendario lunar y la sucesión de las estaciones. Por este motivo, cuando el desfase entre el equinoccio de primavera y el inicio del año lunar lo hace aconsejable, se agrega un mes intercalar, denominado Segundo Mes de la Cosecha. Asignado a la pequeña constelación del Cuervo, dio origen a considerar la cifra 13 como nefasta y a esta ave como portadora de desgracias. En el siglo VI a.C. establecen una regla fija de interpolación, que sería sucesivamente modificada hasta que en el año 383 a.C. se adopta el convenio definitivo de intercalar 7 meses lunares de 29 días en 19 años, encontrándose, finalmente, la concordancia precisa entre el calendario y el año solar.

En Summer eran conocidos y observados minuciosamente cinco planetas, que, al igual que el Sol y la Luna, se distinguen de las estrellas por su movimiento "errante". Este es el origen del número mágico siete y la formación de la semana como ciclo de tiempo, que perdura hasta nuestros días. Los cinco planetas representan para los babilonios divinidades, al igual que en otras culturas. Su aspecto y sus variaciones de brillo y color, hacen que se les asocie un carácter y distintos estados de ánimo, dando lugar a la astrología. Gracias a ello, elaboran teorías acerca de su movimiento, que presentan en forma de efemérides.

Desde sus inicios hasta el último rey de Babilonia, Nabonido, que se ocupa personalmente de la "Ciencia de los Astros", la cultura de los pueblos de Mesopotamia influenciaría tanto las civilizaciones contemporáneas como posteriores. Se debe a que no constituían un mundo cerrado. Por el contrario, situados en una región pobre en si misma en recursos naturales, se caracterizan por un intercambio cultural y comercial tan intenso que se han encontrado sellos de terracota en lugares tan apartados como el sur de Grecia, la India o Anatolia y Armenia. Una prueba de esta influencia podemos encontrarla en el calendario lunar griego, en el que se adoptaría la regla babilónica de meses intercalares, denominándose Ciclo de Meton al período de 235 meses lunares, coincidentes con 19 años solares.

Los egipcios, cuya supervivencia estaba ligada a las periódicas crecidas del río Nilo, estudiaron la sucesión de las estaciones y tenían ya

el concepto de año con anterioridad al 4000 a.C. Su principal aportación en el campo de la astronomía es la construcción de un calendario luni-solar de 365.25 días, que ha perdurado hasta nuestros días debido a que Julio Cesar se dejó aconsejar por un astrónomo egipcio cuando efectuó la reforma del calendario. Determinarían esta unidad de tiempo, fijada de forma definitiva en el año 200 a.C. tras milenios de observación astronómica, sobre la base del período de repetición de los ortos helíacos de *Sothis*, la estrella Sirio, al producirse en esta época el desbordamiento anual del Nilo en el sur del país. Para la medida del tiempo, los egipcios disponen en el 3000 a.C. del gnomon y la clepsidra, al igual que otras culturas, pero poseen, además, diagramas estelares que les permiten determinar la hora durante la noche a partir de la observación de estrellas.

Los conocimientos astronómicos del antiguo Egipto fueron aplicados a la construcción de sus monumentos funerarios. Se sabe que utilizaron la dirección de la plomada para materializar el horizonte y que eran capaces de determinar la meridiana. El método geométrico, simple pero ingenioso, consistía en marcar sobre una plataforma horizontal de piedra los puntos donde el Sol se eleva y se pone. Unidos mediante una recta, la perpendicular intermedia reproducirá la meridiana.

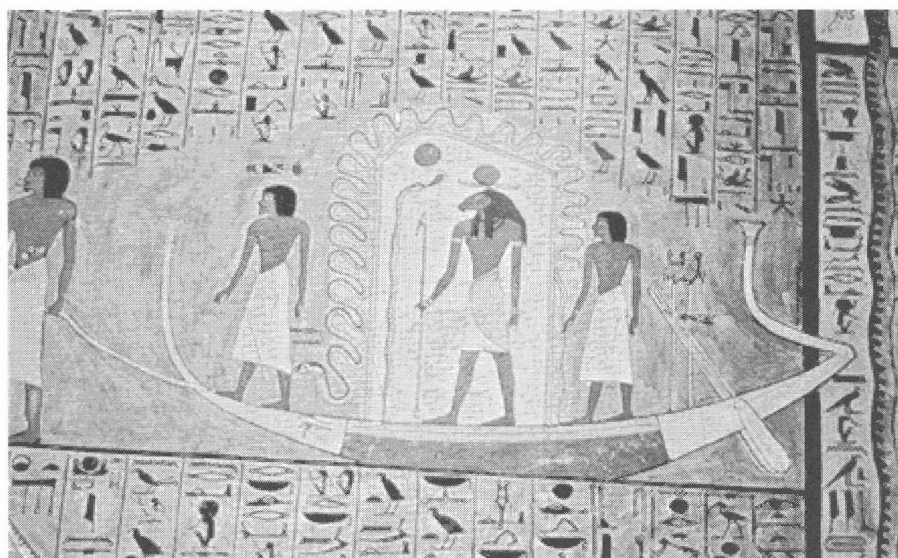


Fig. 4. Barca solar del dios Ra. Tumba de Ramsés I.

Las inscripciones pictográficas descubiertas en los techos de los monumentos funerarios egipcios, utilizados generalmente para representar distintos aspectos de la esfera celeste (agrupación de las estrellas en constelaciones, fases lunares, posiciones de planetas, relojes estelares, etc.), han permitido reconstruir algunos aspectos del nivel de conocimientos astronómicos en temas diferentes del calendario y de la orientación de monumentos. Así, se sabe que observaron el movimiento diurno de los astros, diferenciando las estrellas circumpolares, siempre visibles sobre el horizonte, que denominan *las estrellas imperecederas*. No adoptan las 12 constelaciones mesopotámicas del zodiaco. Consideran una amplia banda zodiacal dividida en 36 *decanos*, que utilizan para dividir el año en idéntico número de períodos de diez días. Los planetas son denominados *las estrellas que nunca descansan*. Mercurio es identificado con *Seth* y Venus denominado el *Cruzador*. Los tres planetas exteriores son considerados tres aspectos diferentes de *Horus*: Marte es el *Horus Rojo*, Júpiter el *Horus que ilumina los dos Países* y Saturno *Horus el Toro del Cielo*.

Las principales aportaciones de **los chinos** a la astronomía son, indiscutiblemente, la exacta predicción de los eclipses de Sol y Luna, efectuada a partir de registros meticulosos, y el correcto posicionamiento de estrellas en un sistema de referencia ecuatorial. A ellos se debe la primera referencia histórica de una observación astronómica, realizada en el año 2697 a.C. durante un eclipse solar. Son, si exceptuamos algunas referencias paleolíticas y japonesas imprecisas, la única fuente de información sobre la aparición de novas anterior al florecimiento de las culturas occidentales. Procedente del II milenio a.C., se ha encontrado un documento grabado en hueso en el que se describe como "... el séptimo día del mes, el día *chi-tsu*, una nueva gran estrella apareció en el cielo al lado de la estrella de fuego". Gracias a ellos poseemos, además, datos de magnitud y duración de la supernova más antigua de la que se tiene referencia, aparecida en el año 185 d.C. en la constelación de Centauro y visible durante ocho meses. En esta región celeste se ha encontrado una pequeña nebulosa que podría ser su residuo.

Desde la época de los reinos guerreros, que se inicia en el 800 a.C., poseen un catálogo de 1464 estrellas, agrupadas en 284 constelaciones, de las cuales se da el número de estrellas que contiene cada constelación, el nombre de las constelaciones próximas y las distancias al polo y al

meridiano del *sieu* más próximo, definido por la división del ecuador celeste en 28 secciones.

En esta gran cultura se sucederán dos teorías cosmológicas: la teoría del *Cielo Recubridor* supone una Tierra plana cuadrada, sobre la que gira una cúpula semiesférica, mientras que en la del *Cielo Esférico*, que data del 200 a.C., el Universo es comparado a un huevo esférico, cuya cáscara sería el firmamento y la Tierra la yema.



Fig. 5. Teoría del Cielo Recubridor. China, siglo XIV a.C.

En el plano de la instrumentación, destaca la utilización del gnomon, de cuadrantes solares y de esferas celestes movidas por molinos de agua, que reproducían el movimiento diurno de los astros. Establecerán un calendario lunisolar de 365 días, más de XXIV siglos antes de nuestra era, por el sencillo procedimiento de medir la duración del año solar mediante el gnomon. Además, determinan desde tiempo inmemorial la meridiana, que utilizarán, al igual que los egipcios, en la orientación de sus monumentos. El método desarrollado consiste en calcular la bisectriz del ángulo formado por las direcciones de las sombras del estilo del gnomon en el amanecer y en la puesta del Sol.

En las **zonas centrales de América**, así como en el **Altiplano Andino**, se desarrollaron de forma independiente grandes culturas. Se caracterizan por sus complejos sistemas de numeración y su interés por la astronomía, que les convierte en grandes observadores de estrellas y planetas. En particular del planeta Venus, al que se alude reiteradamente en los restos arqueológicos encontrados. Sin embargo, no influyeron en la cultura occidental, dado que el primer contacto se produce con la llegada de los españoles, posterior al auge de las principales civilizaciones amerindias.

2. LOS PERÍODOS CLÁSICO Y HELENÍSTICO DE LA ASTRONOMÍA GRIEGA

El pueblo griego se establece al sur de los Balcanes en el segundo milenio antes de nuestra era. En el año 1440 a.C. conquistan Creta y la extinción del Imperio Hitita, en el año 1200 a.C., les permite colonizar la costa occidental de Asia Menor, entrando en contacto con las civilizaciones orientales. Sin embargo, en la ciencia griega se consideran sólo dos períodos: Clásico y Helenístico.

El Período Clásico comienza en el siglo VI a.C., con Tales de Mileto y las Escuelas Jónicas, y concluye con la desaparición de Alejandro Magno (323 a.C.) y de su maestro Aristóteles (322 a.C.). A lo largo de estos tres siglos se acumulan y asimilan los conocimientos de oriente, pero bajo un espíritu de coordinación e investigación que dio lugar a la aparición de grandes maestros en el campo de la astronomía y de la geodesia. La principal característica que diferencia a los griegos de sus antecesores, es la observación científica de los fenómenos naturales y su preocupación por encontrar una explicación razonada de ellos.

El Período Helenístico se inicia con la muerte de Aristóteles y se extiende a lo largo de más de ocho siglos, caracterizándose por el nacimiento y desarrollo de la escuela de Alejandría. En los cien primeros años de esta época, el impulso de la astronomía y de la geodesia fue de tal magnitud que los trabajos de Aristarco y Eratóstenes, tanto desde el punto de vista intuitivo como cuantitativo, no han sido superados hasta la

edad moderna. Le sucede una etapa de decadencia, caracterizada por las *Enciclopedias*, pero resurge en el siglo II, coincidiendo con un nuevo auge de la escuela de Alejandría, que contará con la figura de Tolomeo.

Dada la complejidad y extensión de las numerosas teorías griegas sobre el *Sistema del Mundo*, enumeraremos a continuación únicamente algunas de las más destacadas.

Tales de Mileto (640-597 a.C.) es, sin duda, uno de los mayores innovadores de la historia del pensamiento. Introduce el concepto de "los primeros principios", los actuales axiomas, que no se pueden explicar al ser evidentes por sí mismos. Considera el agua del océano como "origen y principio de todas las cosas, de la que todo deriva y a la que todo vuelve". Estamos ante una primitiva ley de conservación de la materia, que en la segunda mitad del siglo XVIII enunciaría Levoisier. Además, fue el primero en decir que la Luna era iluminada por el Sol. Esta opinión, discutida durante mucho tiempo, sería asumida por Anaxágoras y Empédocles. Su idea del mundo no es muy diferente a la concepción babilónica: un disco plano centrado en Delfos que flota en el océano, encerrado en la bóveda esférica y material del cielo. La celebridad alcanzada por Tales en su época se debe a su exacta predicción del eclipse de Sol del 28 de mayo del año 585 a.C.

Anaximandro (611-545 a.C.), discípulo de Tales de Mileto, fue fiel a su único principio de todas las cosas. Cosmológicamente considera la Tierra como un cilindro oblongo en equilibrio indiferente en el espacio, extendiéndose en torno al Mediterráneo. Para él, los cielos son esféricos, encierran nuestra atmósfera y forman una serie de capas que contienen la Luna, el Sol y las estrellas. Sería, por lo tanto, el primero en intentar ordenar los cuerpos celestes en función de su distancia. Se le atribuye el mérito de enseñar a los griegos el uso del gnomon.

Hacia el 500 a.C., comienza a abrirse camino entre los filósofos griegos la idea de una Tierra esférica, teoría que había sido aceptada por los egipcios y, posiblemente, por los babilonios años antes.

Pitágoras fue un gran viajero y amante de las simetrías que se dan en la naturaleza. Al llegar a la conclusión de que la armonía es la ley fundamental del cosmos, le parece incuestionable que la figura de la

Tierra sea una esfera. Puesto que una simple intuición no satisface el racionalismo griego, muy pronto se comienzan a hacer pruebas y verificaciones. Así, la sombra del gnomon adquiere toda su utilidad, al hacer resaltar el hecho de que, para una misma hora y fecha, su sombra se acorta hacia el ecuador y se alarga en dirección a los polos. Se pone, además, de manifiesto que las estrellas que describen los círculos de menor radio, se encuentran más próximas al horizonte cuando se viaja hacia el sur. Finalmente, **Parménides de Elea** hablará de franjas climatológicas sobre la Tierra y de cielos concéntricos con ellas, encontrando en estos fenómenos la confirmación de que la Tierra es esférica. Años más tarde, en torno al 450 a.C., Anaxágoras de Clazomene verifica esta hipótesis al observar que la sombra proyectada por la Tierra sobre la Luna, durante los eclipses, es circular.

En cuanto a la naturaleza de los cuerpos celestes, **Anaxágoras** afirma que el Sol y las estrellas son piedras incandescentes. Aunque esta teoría es ciertamente innovadora, no lo es tanto como la idea del mundo que poseen **Leucipo de Elea**, perteneciente a la escuela atomista, y su discípulo **Demócrito**, nacido en Abdera en el 460 a.C., al considerar, muy adelantados a su tiempo, el Sol y la Luna como cuerpos sólidos y la Vía Láctea la consecuencia de la luz de numerosas estrellas. Demócrito basa su teoría en los átomos que, en continuo movimiento, se combinan a veces en el vacío. Los átomos son infinitos y poseen infinitas formas. De ello deduce que el Universo es infinito y que la Tierra es uno de los infinitos mundos. Estos conceptos, nuevos para el pensamiento clásico, son rechazados por Aristóteles, que los considera absurdos.

Filolao, en el 400 a.C., lanza la hipótesis de un *foco central*, alrededor del cual giran la Tierra, el Sol y todos los astros. Explica el movimiento aparente considerando una revolución rápida de la Tierra en una órbita pequeña.

Platón (427-347 a.C.) da una gran importancia a la geometría. Esta será la base para desarrollar una astronomía que no consista en la simple recopilación empírica de datos. Su sistema geocéntrico explica el movimiento de los astros mediante una composición de movimientos circulares uniformes en torno a una Tierra esférica e inmóvil en el espacio. Conocedor del complejo desplazamiento aparente de los planetas, confía

la solución geométrica del problema a sus discípulos, obligados a considerar para ello la armonía de los ciclos perfectos.

Eudoxio (408-355 a.C.) funda una escuela y un observatorio en Cizico, posiblemente el primero del mundo griego. Formula un modelo geocéntrico del Mundo formado por 27 esferas homocéntricas, agrupadas en ocho sistemas independientes, como solución del problema planteado por Platón. La esfera de mayor diámetro, al girar aislada en torno al eje del mundo, rige el movimiento de las estrellas fijas. Para los demás astros considera, por el contrario, sistemas múltiples: tres esferas para la Luna, tres para el Sol y cuatro para cada uno de los cinco planetas. Dentro de un mismo sistema, el eje de rotación de cada una de las esferas es solidario con la envolvente, produciéndose, en consecuencia, un movimiento de arrastre que determina la combinación de movimientos circulares uniformes. Así, para explicar las curvas descritas por los planetas, denominadas *hipópedes* por Eudoxio, se parte de la esfera exterior, que gira en el espacio con una rotación uniforme idéntica en eje y velocidad que la esfera de las fijas. La segunda esfera, ligada a la anterior, reproduce el movimiento anual a lo largo de la eclíptica y las dos esferas internas, girando en sentido opuesto con diferente inclinación, representan el movimiento orbital. El astro considerado está ligado al ecuador de la esfera interna del sistema al que pertenece. En este sistema permanece constante la distancia a la Tierra.

Aristóteles (384-322 a.C.) plantea la hipótesis de un mundo continuo y finito. Transforma el modelo matemático de Eudoxio, elevando el número de esferas a 55. Así como sus escritos sobre psicología no se han podido superar hasta el siglo XIX, este filósofo, contrario a la geometría y enemigo de los números, no puede ser considerado como un astrónomo. Sin embargo, su cosmología ha influido y condicionado la astronomía durante 1800 años.

Aristarco de Samos (310-230 a.C.), gran figura del período helénístico, propone un modelo astronómico heliocéntrico y heliostático 1800 años antes que Copérnico. Este sistema explicaba el movimiento aparente de retroceso de los planetas, al considerar que, tanto la Tierra como los cinco planetas conocidos, giraban alrededor del Sol con un movimiento de traslación. Considera, además, la Tierra girando en el

espacio, con un período de 24 horas, en torno a un eje que, con una inclinación adecuada, le explica el hecho de que los astros se eleven y desciendan periódicamente respecto al horizonte. Estas teorías fueron rechazadas por los aristotélicos.

En la misma línea de investigación teórico-observacional que Aristarco, destaca **Eratóstenes de Cirene** (276-195 a.C.), el primer gran geodesta de la historia. Entre sus resultados más importantes se encuentran sus trabajos cartográficos y la medida de la oblicuidad de la eclíptica, coincidente con la latitud de Siena, ciudad situada en el trópico. Sin embargo, la empresa que le dio mayor fama fue la determinación de la longitud del meridiano terrestre, a partir de las distancias cenitales del Sol observadas en Siena y Alejandría, con una precisión que no fue superada hasta el siglo XVIII. En el campo de la astronomía es necesario hacer referencia a su obra "Elevaciones de los Astros", donde se describen unas 50 constelaciones. En ella, se adjunta un "Índice de los Astros" que, junto a los trabajos de Aristilo y Timocares, constituye uno de los primeros intentos de construir un catálogo estelar en el mundo griego.

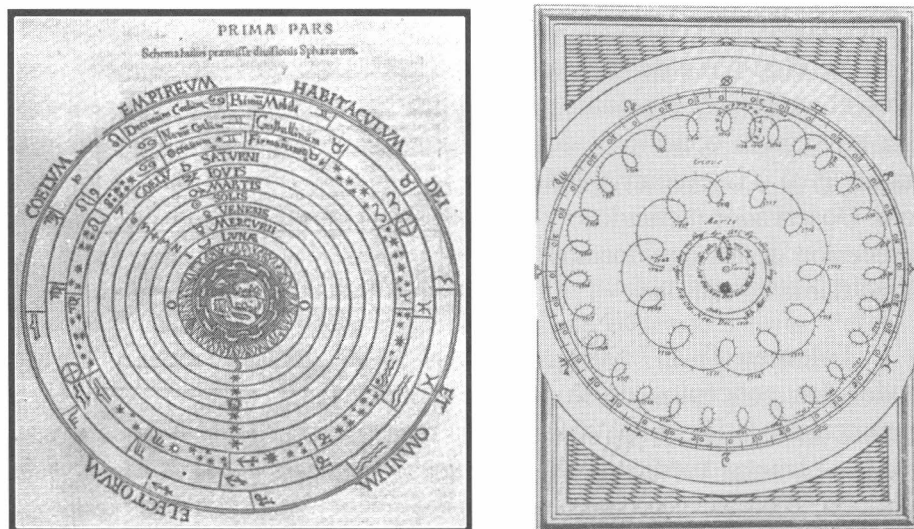


Fig. 6. Izquierda: el sistema del mundo de Aristóteles. Derecha: Modelo de epiciclos de los planetas Marte, Júpiter y Saturno.

Apolonio (240-170 a.C.), desechando el sistema de esferas homocéntricas, trata de explicar los movimientos directo y retrógrado de los planetas, la proximidad de Mercurio y Venus al Sol y las variaciones en iluminación y semidiámetro, mediante una combinación de *epiciclos* y *deferentes*. Se trata de un modelo geométrico en el que un pequeño círculo, el epiciclo, de radio igual a la excentricidad del planeta, se desplaza sobre un círculo de mayor tamaño denominado deferente. El astro considerado recorre el epiciclo en sentido retrógrado con un período igual al tiempo empleado por su centro en recorrer el deferente. Explica el movimiento diurno de los planetas, considerando que sus deferentes son arrastrados por la rotación de la esfera celeste. Esta hipótesis sería aceptada por Hiparco y Tolomeo, aunque este último sustituiría en su "Teoría de los Planetas" las circunferencias por esferas.

Hiparco de Nicea (190-125 a.C.), también denominado de Rodas por su permanencia en esta ciudad de larga tradición astronómica, introdujo en Grecia la división del círculo en 360 grados, hasta aquel momento solo utilizada por los babilonios. Considerando tanto sus observaciones como las efectuadas por astrónomos de Babilonia y Alejandría, demuestra la equivalencia entre el sistema de los epiciclos y el modelo matemático de excéntricas, extendido entre los griegos desde el siglo III a.C. En el sistema de las excéntricas móviles se consideraba, en oposición al modelo de Apolonio, una órbita circular cuyo centro se desplazaba, en sentido opuesto al del planeta en su órbita, sobre un círculo de radio igual a la excentricidad centrado en una Tierra inmóvil en el espacio. Observador meticuloso y gran teórico, Hiparco descubre y evalúa la precesión de los equinoccios, idea el astrolabio y realiza el primer catálogo fiable de estrellas.

Tolomeo (fl. 137 a.C.), autor de la "Syntaxis Mathematica", resume todos los conceptos de la astronomía antigua. Siguiendo el método geométrico de Hiparcos, describe los movimientos del Sol, de la Luna y de los planetas mediante un sistema mixto de epiciclos y excéntricas. Amplia, además, el catálogo estelar de Hiparco. En esta obra aparece por primera vez una clasificación de 1022 estrellas en seis magnitudes, parámetro asignado en función del brillo aparente. Desgraciadamente, el catálogo estelar de Hiparco, conocido por referencias de otros autores, se ha perdido. Parece que en él se establecían las posiciones de 800 estre-

llas en coordenadas eclípticas, dividiéndolas en tres categorías según su brillo. Puede considerarse que estos dos astrónomos de la escuela de Alejandría son los iniciadores de la fotometría, que tendría su auge en siglos posteriores.

3. LA ÉPOCA DE LA OSCURIDAD, BIZANCIO Y LA CIENCIA ÁRABE

Cuando muere sin sucesor Alejandro Magno Grecia es repartida entre sus generales, formándose tres estados que se debilitan políticamente. Esta situación propicia el que los romanos, aparecidos como cultura en el año 753 a.C., dominen Macedonia (168 a.C.), Grecia (146 a.C.) y Egipto (100 a.C.), extendiéndose por todo el Mediterráneo.

Los romanos introducen un sistema de numeración que hace prácticamente imposible el cálculo matemático. Por este motivo, sus aportaciones a las matemáticas, la astronomía y la geodesia son muy reducidas. Podemos exceptuar los trabajos de Plinio "El Viejo", gran observador de los fenómenos naturales, español de nacimiento, que en el siglo II d.C. describe en su "Historia Naturalis" lo que posiblemente sea la primera referencia histórica de los fenómenos de mareas terrestres.

En el año 395 Teodosio divide el Imperio Romano en dos: el Imperio de Occidente, que desaparece en el año 476 por la invasión de los bárbaros del norte, y el Imperio de Oriente, que subsistió hasta 1453. Este es el motivo de que Bizancio, o Imperio de Oriente, sea el depositario de los manuscritos y la cultura griega.

En el año 500 nos encontramos con un pueblo habitante de la Península Arábiga, que, a partir del año 632, se extiende a Siria, Persia y Egipto, pertenecientes a Bizancio, el Indostán, norte de Africa y la península Ibérica. Los árabes serán durante 500 años el pueblo más rico y poderoso del mundo conocido. En este período de la historia, Europa occidental conoce y acepta solamente el sistema de Tolomeo y la filosofía aristotélica, al mismo tiempo que dispone de un sistema de numeración inadecuado. Sin embargo, el mundo árabe, depositario de las culturas persa, griega y bizantina, no adopta el sistema aristotélico, no combate ninguna teoría sobre el mundo y conserva la tradición científica y el espíritu de los griegos.

El desarrollo de la ciencia árabe en oriente se inicia en Bagdad bajo el impulso de al-Mansur (754-775). Este califa es el responsable de la traducción al árabe de numerosas obras de astronomía indúes, persas y griegas. El máximo esplendor se alcanza con al-Mámún (786-833), que continua con la escuela de traductores, funda la "Casa de la Sabiduría", reuniendo numerosos científicos, y manda construir observatorios en Bagdad y Damasco. Es de señalar que, dentro de su reinado, Isháq Ibn Hunayn traduce la "Syntaxis Mathematica" de Tolomeo, dándole el nombre de *Al-Magesto*. Al-Sufi (902-986) adapta a su época el catálogo estelar de Tolomeo, corrigiendo de precesión los datos originales. Destaca también, en este período de la ciencia árabe de oriente, Avicena (980-1037), que practicó la observación y el estudio del cielo con un instrumento altacimutal de su invención, dejando notables obras que ejercieron una gran influencia en los astrónomos hispanoárabes posteriores.

Debido, sobre todo, a las sucesivas invasiones de los turcos, en el siglo XI se inicia la decadencia de la ciencia árabe en Oriente Medio, pasando el centro de gravedad de la cultura a al-Andalus.

Los astrónomos hispanoárabes trataron en sus estudios de mejorar la concepción del mundo, pero siempre apoyándose en las teorías de los grandes filósofos y, en particular, de Aristóteles. Con este motivo, perfeccionaron los instrumentos y los métodos de observación, elaborando tablas astronómicas tan precisas y completas que serían utilizadas en todo el mundo durante varios siglos.

Las principales figuras de la astronomía española en los siglos XI, XII y XIII son: Ibn al-Sid al Batalúsi (1052-1127), Azarquiel (1029-1100), Avempace (1106-1138), Geber (?-1140), Averroes (1120-1198), Maimónides (1135-1204) y Alpetragio (?-1200).

De entre todos los científicos anteriormente nombrados destaca Azarquiel, posiblemente el hombre más sabio de su tiempo. Profundamente interesado en los movimientos de los astros, estudia la precesión de los equinoccios, obteniendo un valor de 46" por año, muy próximo al que hoy admitimos, y la oblicuidad de la eclíptica, que hace variar entre 23° 33' y 23° 53'. Así mismo, es autor de las famosas "Tablas Toledanas", que fueron, durante más de un siglo, de gran utilidad en el cálculo del movimiento de los planetas y, traducidas al latín, difundidas por toda Europa.



Fig. 7. La constelación de Andrómeda. Al-Sufi, siglo X.

Otro astrónomo relevante de esta época fue Averroes, considerado como uno de los españoles que más ha influido en el pensamiento humano. Alcanzaron una extraordinaria difusión en Europa sus "Comentarios" a la obra de Aristóteles. Gran admirador de este filósofo, sigue sus teorías y, en particular, la concepción aristotélica del Universo, por lo que acepta el sistema de esferas homocéntricas. Sin embargo, a fin de poder explicar los movimientos alternativamente directos y retrógrados de los planetas, introduce, para cada uno de ellos, dos esferas animadas de movimientos de rotación opuestos, que giran alrededor de diferentes ejes. Este modelo continúa sin explicar la variación de las distancias.

La preocupación de los árabes por la astronomía y su mente inquisitiva y liberal, abierta a todas las ideas, hizo posible que las ciencias griega y orientales llegaran a Europa a través de España. Un hecho fundamental en la transmisión de la cultura griega al mundo occidental, lo constituye la traducción al árabe de las obras de los principales filósofos. Dichas obras, serían traducidas del árabe al latín en el siglo XII y difundidas en Europa por los escolásticos. Así, aunque sólo consideran válidas las teorías aristotélicas, que apoyan su dogmatismo del hombre como coronación de la Creación y, por lo tanto, centro del Universo, darán lugar años más tarde a la revolución Copernicana. Fue, también, determinante en el desarrollo científico europeo posterior, la sustitución del sistema de numeración romano por el árabe, que se debe al matemático italiano Leonardo de Pisa. Fue utilizado por primera vez por Jhon de Hollywood, en un libro de texto de aritmética y astronomía.



Fig. 8. El curso de la Luna a través de las constelaciones. Manuscrito del siglo IX.

4. LA OBRA ASTRONÓMICA DE ALFONSO X EL SABIO

No es posible escribir una historia de la astronomía sin hablar de Alfonso X (1221-1284), el hombre más culto de su tiempo. La obra del Rey Sabio se centra en dos puntos: los "Libros del Saber de Astronomía" y las "Tablas Alfonsíes".

Alfonso X se interesa por la astronomía estudiando los escritos árabes, tanto orientales como del Califato de Córdoba. A través de ellos conoce las obras de los principales filósofos griegos y, en especial, las de Aristóteles y Tolomeo. Pronto se da cuenta de que el progreso de la ciencia está supeditado a la observación y de que, además, los movimientos de los astros pueden tener períodos de miles de años, por lo que para determinarlos son necesarias largas series de observación. En virtud de esto, forma un equipo de investigación, con sede en Toledo, que agrupa sabios y expertos en instrumentación cristianos, árabes y judíos. Les fue encomendado:

1. Formar una biblioteca que reúna el mayor número posible de obras científicas, tanto de la España cristiana como de la musulmana, y traducirlas al castellano.
2. Construir y perfeccionar los instrumentos de observación astronómica ya existentes y enseñar su manejo a los observadores. Este trabajo fue recogido en los "Libros Alfonsíes de los Instrumentos".
3. Efectuar numerosas observaciones, que, una vez unidas a las realizadas en épocas anteriores, permitirían elaborar las "Tablas Alfonsíes". Estas tablas astronómicas fueron conocidas y utilizadas en toda Europa hasta que en el año 1697 Kepler publica las "Tablas Rudolfinas", calculadas por Tycho Brahe.

El resultado del trabajo realizado por los colaboradores de Alfonso X el Sabio fue recopilado en los "Libros del Saber de Astronomía", algunos de cuyos volúmenes ya han sido citados.

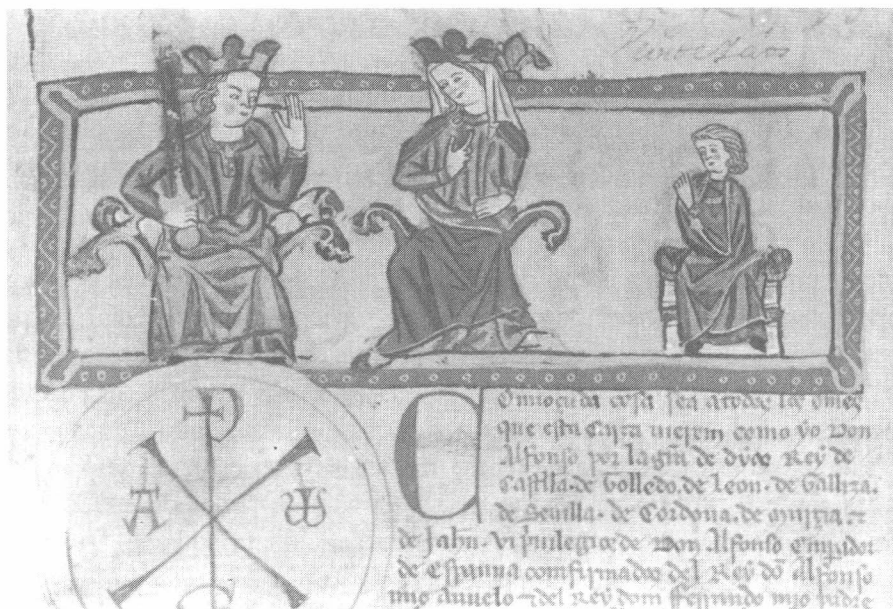


Fig. 9. Alfonso X en una miniatura del tumbo de Tojos Outos.

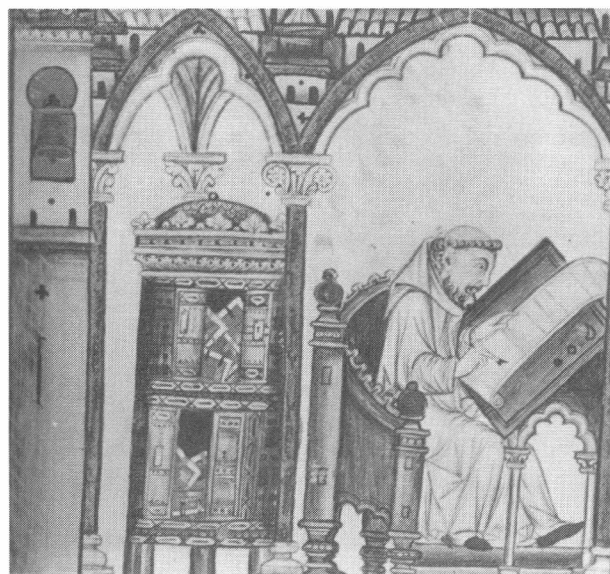


Fig. 10. Scriptorium de un monje en el siglo XII.
Miniatura de las "Cantigas".

5. LA REVOLUCIÓN COPERNICANA

Con el espíritu renovador del Renacimiento comienzan a surgir en Europa ideas científicas desvinculadas de los esquemas tradicionales aristotélicos. El comienzo de esta nueva era fue marcado por **Copérnico** (1473-1543), al abandonar la concepción geocéntrica del mundo, junto con la invención de la imprenta por Gutenberg en el año 1450, que permitiría la extensión del conocimiento.

Copérnico no explica en su obra cómo ha llegado a su concepción del mundo, pero puede pensarse que fue a través de sus estudios de filosofía griega, realizados durante una prolongada estancia en las universidades italianas, puesto que autores como Filolao, Heráclides o Aristarco de Samos ya habían propuesto modelos heliocéntricos en los que la Tierra no permanecía inmóvil. Polaco de nacimiento, cursa sus primeros estudios científicos y humanistas en la Universidad de Cracovia, donde asiste a las clases impartidas por Alberto de Brudzewo, astrónomo y matemático. A fin de completar su formación, se traslada a Italia en 1496. El 6 de enero de 1497 se inscribe en la Facultad de Derecho de la Universidad de Bolonia, que en aquella época era centro de reunión de prestigiosos humanistas y científicos. Durante su permanencia de más de tres años en esta ciudad, estudia griego con Antonio Urceo, que le permite leer los textos originales de los antiguos filósofos pitagóricos, matemáticas con Escipión dal Ferro y Luca Pacioli y astronomía con Domenico María Novara. En la primavera de 1500 viaja a Roma con motivo del Juvileo y permanece en su Universidad durante aproximadamente un año. En 1501, tras una corta estancia en Polonia a fin de tomar posesión de su cargo como canónigo de Frauenburg, continúa sus estudios de astronomía en Padua, que alterna durante cuatro años con leyes y medicina. Se ausenta de esta ciudad en 1503 con motivo de obtener el grado de Doctor en Derecho Canónico. Dotado de una amplia cultura, regresa finalmente a su país en 1504. En Frauenburg culminaría su obra *De Revolutionibus Orbium Coelestium*, impresa en Nuremberg en 1543, donde describe la teoría del movimiento de los planetas vigente hasta entonces, sus dificultades y sus errores, llegando a la conclusión de que en ella se debía haber pasado por alto algo muy importante, dado que las posiciones de la Luna y de los Planetas calculadas mediante las Tablas Alfonsinas no coincidían con las observaciones.

Su sistema del mundo, expuesto a lo largo de su obra, establece tres puntos fundamentales:

1. Un cuerpo esférico, abandonado a sí mismo, gira en el espacio.
2. No existe un único punto central de las esferas celestes. El centro de la Tierra no es el centro del mundo, sólo el de gravedad y el de la órbita lunar. Todas las órbitas planetarias, incluida la de la Tierra, rodean el Sol.
3. La proporción entre la distancia Sol-Tierra y la altura de la esfera celeste es menor que la existente entre el radio de la Tierra y la distancia al Sol. Por lo tanto, la distancia Sol-Tierra es imperceptible frente a la altura del Cielo.

Así, el sistema copernicano es heliocéntrico, pero excéntrico, a fin de poder explicar las variaciones de brillo de los planetas. Mantiene el movimiento circular uniforme como base de su mecánica celeste, por lo que, para explicar el movimiento planetario, debe combinar epiciclos y deferentes hasta un total de 34.

Otra gran figura de esta época es **Tycho Brahe** (1546-1601), astrónomo danés, cuyo modelo consistía en hacer girar los planetas alrededor del Sol, y el Sol alrededor de la Tierra. Lo que impidió a Tycho Brahe adoptar el sistema de Copérnico fue la imposibilidad de descubrir paralajes en las estrellas fijas, a pesar de la exactitud de sus observaciones. Su sistema del mundo es un paso atrás en la historia de las teorías astronómicas. Sin embargo, desde el punto de vista de la historia de la ciencia, sus trabajos tienen una gran importancia, pues crea una astronomía de observación cuyos datos, de una inaudita precisión para su época, llevaron a Kepler a establecer sus teorías. Por otra parte, construyó instrumentos de observación más precisos que los existentes hasta entonces. Entre ellos figuran el cuadrante, el sextante y un modelo primitivo de teodolito. Además, determina los límites de precisión de las observaciones y corrige de refracción las posiciones aparentes de los astros. Entre sus obras más notables se encuentra *De Mundi Aetherei Recentioribus Phaenomenis Liber Secundus*, donde describe los resultados de la observación sistemática del gran cometa de 1577. Sería el primero en

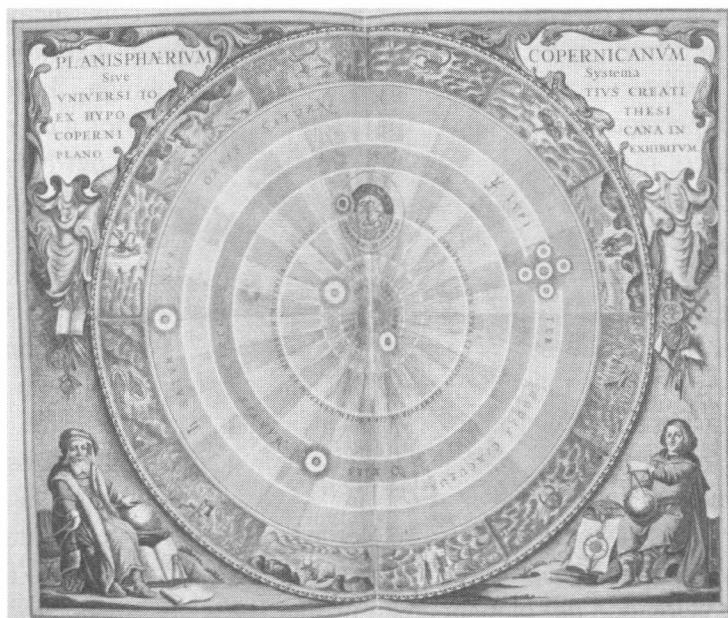


Fig. 11. Sistemas del mundo Tolomaico y Copernicano.
Grabados de 1660.

demostrar que los cometas, en virtud de su pequeña paralaje, poseían una órbita supralunar secante a las planetarias, por lo que debían pasar a través de las esferas sólidas, supuesto que estas existieran. En esta publicación sugiere, además, que la órbita del cometa podría ser "... no exactamente circular, sino ovalada". Es, por lo tanto, el primer astrónomo que intuye la posibilidad de que un cuerpo celeste se desplace siguiendo una órbita no circular.

6. LA EDAD DE ORO DE LA ASTRONOMÍA DE POSICIÓN

El siglo XVII es una época de extraordinaria renovación en astronomía. A lo largo de él se extiende el movimiento que, iniciado en el siglo XVI, transformaría la concepción medieval del mundo en el pensamiento científico moderno. Artífices de este desarrollo son Johannes Kepler (1571-1630), Galileo Galilei (1564-1642), Huygens (1629-1695) e Isaac Newton (1642-1727).

Toda la obra de **Kepler** está basada en las teorías copernicanas. Ya en su primer trabajo, titulado *Prodromus Disertationum Cosmographicarum Continens Mysterium Cosmographicum* (Tubinga, 1596), demuestra la perfecta adaptación de los fenómenos planetarios a un modelo heliocéntrico, razón por la cual no acepta la concepción del Mundo de Tolomeo. En esta misma obra Kepler formula su primer gran descubrimiento: los planos de las órbitas planetarias, próximos entre sí pero sin confundirse, pasan por el Sol. Obtiene, como consecuencia, que la inclinación de los planos orbitales sobre la eclíptica es constante. En febrero de 1600 Kepler se desplaza a Praga, donde Tycho Brahe le confía las meticulosas observaciones realizadas durante 16 años del planeta Marte. Sobre esta base inicia la redeterminación de la órbita terrestre. En un principio trabaja sobre la hipótesis de que la órbita de la Tierra es circular. Además, al ignorar el principio de inercia, imagina que la acción animadora del Sol sobre la Tierra se ejerce tangencialmente a la trayectoria, es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia Sol-Tierra e igual a la velocidad del planeta en su órbita. Estas dos afirmaciones son erróneas, pero, precisamente tratando de determinar el tiempo empleado por la Tierra en recorrer un arco infinitamente pequeño de su órbita, descubre la proporcionalidad entre el tiempo y el área barrida por el

radio vector. Una vez revisada la órbita de Marte, Kepler enuncia la segunda ley o "Ley de las Areas", que es la primera en orden cronológico. Sobre esta base, realiza nuevas observaciones, llegando a la conclusión de que las órbitas planetarias son elipses, en uno de cuyos focos se encuentra el Sol (Primera Ley), ya que ésta es la cónica que mejor se adapta a la Segunda Ley. Enuncia estas dos primeras leyes en su tratado *Astronomia Nova aitiologetos, seu Physica Coelestis tradita commentariis de motibus Stellae Martis ex observationibus G.V. Tychonis Brahe*, publicado en 1609. Mucho más tarde, el 15 de mayo de 1618, enuncia la "Tercera Ley": la proporcionalidad del cuadrado de los períodos de los planetas al cubo de sus distancias medias al Sol. Su actividad no se limitó a las matemáticas, también fue un gran observador, estudiando, al igual que Galileo, los cometas y las manchas solares.

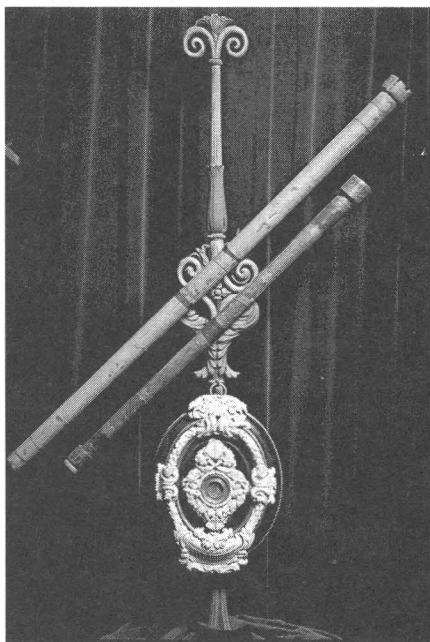


Fig. 12. Catalejo de lente de Galileo. Museo de las Ciencias, Florencia.

La fama de **Galileo** se debe a las observaciones de la nova de 1604. Con él aparece una idea auténticamente nueva: la relatividad del movimiento. Aplica el telescopio a las observaciones astronómicas y enuncia

las primeras leyes de la mecánica. En el año 1604, descubre los cráteres de la Luna al enfocar con su telescopio por primera vez el firmamento. Continuando con este estudio, describe las montañas de la Luna, deduciendo su altitud de la comparación de los radios de la Tierra y de la Luna. Estudiando la luz reflejada por la Luna, supuso que la Tierra debería brillar como los demás planetas. También descubrió los cuatro primeros satélites de Júpiter que, en su honor, se denominan galileanos.

Huygens, interesado en el problema de la óptica, comprendió que cualquier nuevo progreso en astronomía dependía del perfeccionamiento de los instrumentos. En 1655 talló su primera lente. Con objetivos de su invención, descubrió Titán, el mayor de los satélites de Saturno, y el anillo que rodea este planeta. A él se debe la aplicación del péndulo a los relojes. En 1659 demostró que Marte giraba en torno a un eje y en 1666 descubrió la nebulosa de Orión.



Fig. 13. Telescopio construido por Newton en 1688.

En el año 1687 se publica el tercer libro de los *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* de **Newton**, donde se enuncia la famosa "Ley de la Gravitación Universal", que dará lugar al nacimiento de una nueva ciencia: la Mecánica Celeste. Basándose en ella, comprueba matemáticamente las leyes de Kepler, explicando de forma precisa el movimiento de los planetas conocidos y de sus satélites (cuatro de Júpi-

ter y cinco de Saturno), las distancias al Sol, sus masas, densidades, etc. Establece, además, la "Teoría de Equilibrio", consecuencia directa de su recién descubierta Ley de Gravitación, que aplica a una capa simple de océano, sin fuerzas de rozamiento interno y sin inercia, que recubre una tierra esférica y está sometida a la acción gravitatoria del Sol y de la Luna; se trata de la primera explicación correcta del fenómeno de marea oceánica. En óptica, demostró que la luz blanca se compone de los colores fundamentales del espectro y estableció la teoría de la emisión de la luz.

7. LA ASTRONOMÍA EN EL SIGLO XVIII. NACIMIENTO DE LA GEODESIA COMO CIENCIA INDEPENDIENTE

En los primeros años del siglo XVIII continuaba sin resolverse el problema de la figura de la Tierra. Newton, aplicando su Ley de Gravitación Universal al estudio de la figura de equilibrio que adoptaría un fluido aislado, sometido a rotación, deduce que la forma de la Tierra debería ser un elipsoide de revolución achatado por los polos. Esta conclusión estaba de acuerdo con las observaciones de Ritcher y de Huygens. Sin embargo, Cassini, que había efectuado observaciones en Francia entre los años 1683 y 1718, afirmaba que el achatamiento del elipsoide era ecuatorial. Para poner fin a las controversias, la Academia de Ciencias de París organizó, en 1735, dos expediciones con objeto de medir arcos de meridiano en las proximidades del Ecuador y del Círculo Polar Ártico. Los resultados confirmaron las teorías de Newton. Sin embargo, es necesario añadir que, aunque estas mediciones pusieron fin a la controversia, el problema de determinar la forma de la Tierra solo quedaba iniciado. Con este objetivo, a partir de la segunda mitad del siglo XVIII, se empiezan a establecer grandes triangulaciones. En su observación se utilizan instrumentos cada vez más precisos, a los que incorporan grandes mejoras en los sistemas ópticos y mecánicos. Así, en esta época, se comienza a estructurar la geodesia clásica, que, con el paso del tiempo, tomaría un auténtico protagonismo científico. En este punto se considera que nace la geodesia como ciencia independiente de la astronomía.

El interés suscitado por la publicación de la obra de Newton tuvo, también, repercusiones en el campo de las mareas oceánicas. En 1738, la

Academia de Ciencias de París estableció un concurso para premiar las mejores aportaciones a la teoría de equilibrio, compitiendo autores de la talla de Bernouilli, Euler y McLaurin. Sin embargo, esta teoría solo explica el mecanismo general de las mareas, ya que las particularidades de este fenómeno solo pueden ser explicadas en el campo de la hidrodinámica y teniendo en cuenta, entre otros factores, la inercia de las masas de agua, la forma y profundidad de las cuencas oceánicas y la influencia perturbadora de las barreras naturales que constituyen los continentes. Reconociendo la dificultad de encontrar una solución exacta del problema, Laplace introduce, en 1776, la simplificación de considerar un océano incompresible y no viscoso, recubriendo uniformemente toda la Tierra sometido a las fuerzas derivadas del potencial lunisolar de primer orden. Este primer sistema de ecuaciones hidrodinámicas, constituye la base de todos los modelos matemáticos posteriores, por lo que no ha perdido su vigencia a lo largo de los años.

La gran preocupación de los astrónomos de este siglo fue la medida de la posición de los astros del Sistema Solar y de las estrellas. Obra de ellos es el nacimiento de la Astrometría. Se planteó, además, el problema de la determinación de órbitas a partir de la observación, quedando abierto uno de los campos esenciales de la Mecánica Celeste.

Dada la imprevisibilidad de las apariciones de los cometas, E. **Halley** (1656-1742) piensa que sus órbitas deberían ser parábolas o hipérbolas. Entre ambas posibilidades elige la parábola, matemáticamente más simple. Selecciona, entonces, 24 cometas brillantes aparecidos entre 1337 y 1698, encontrando que 21 de las series de observación se ajustan, efectivamente, a órbitas parabólicas. Sin embargo, las apariciones de tres cometas brillantes, ocurridas en 1531, 1607 y 1682, tenían órbitas no parabólicas casi idénticas, por lo que debería tratarse del mismo cuerpo. Este cometa se desplazaría con movimiento retrógrado, en un período de 76 años, sobre una órbita tan extremadamente elíptica que sus distancias perihélica y afélica, de 0.59 y 35.31 unidades astronómicas, respectivamente, quedarían enmarcadas por las órbitas planetarias Mercurio-Venus y Neptuno-Plutón. Tal como había previsto Halley, el cometa aparecería de nuevo en 1758, años después de su muerte, siendo designado con el nombre de su descubridor. Se había establecido, por primera vez, que los cometas eran miembros del Sistema Solar. En 1718, este gran astrónomo

inglés estudia la variación de las posiciones relativas de Aldebarán y Arturo respecto a otras estrellas próximas, comparando las posiciones ocupadas en el siglo XVII con las proporcionadas por los antiguos catálogos estelares. Descubre, de esta forma, el movimiento propio de las estrellas.

Merece la pena destacar, así mismo, la obra de un astrónomo: **Bradley** (1692-1762), al que se debe el descubrimiento del fenómeno de nutación, que afecta al eje de rotación de la Tierra, y de la aberración de la luz, que reforzaría las teorías del movimiento heliocéntrico.

Conocido el hecho de que los planetas describen órbitas en torno al Sol con un alejamiento progresivo, se establece a mediados de este siglo una ley empírica, simple en sí misma, pero imprescindible para los astrónomos del siglo XIX en el descubrimiento de nuevos miembros del Sistema Solar. Esta ley, enunciada por el alemán **Wolf** en

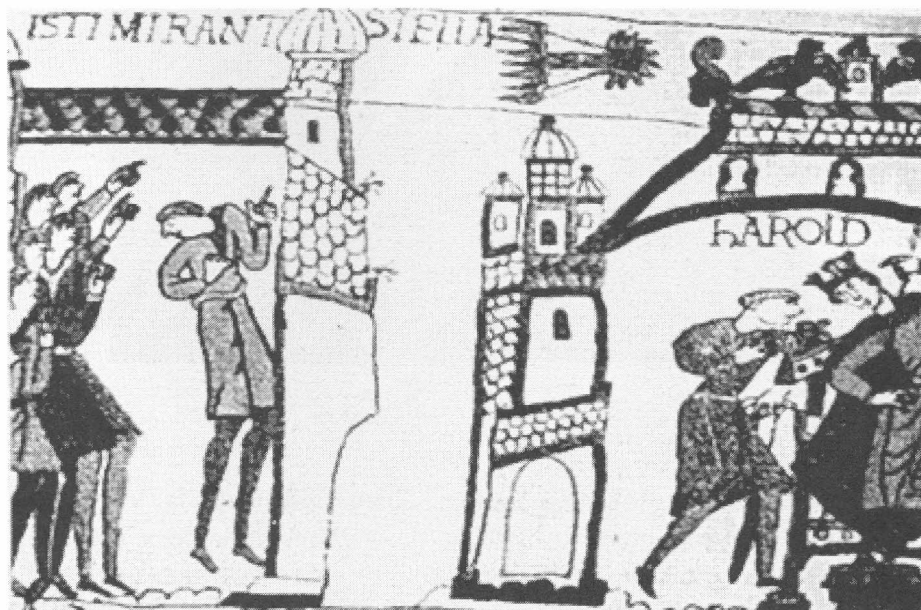


Fig. 14. Detalle del tapiz de Bayeux "La invasión de los normandos en Inglaterra". Representa el cometa Halley presagiando desgracias al rey sajón Haroldo, al que vence y da muerte en la batalla de Hastings Guillermo el Conquistador en 1066, iniciando la dominación normanda.

1741, publicada por **Titius** en 1772 y formulada de forma matemática por **Bode** en 1778, proporciona la distribución espacial de los planetas en orden creciente de distancias al Sol. Se consolida de forma espectacular cuando, al descubrirse Urano, se comprueba que el valor de su semieje mayor presenta unacoincidencia casi absoluta con el valor 196 de la serie de Bode.

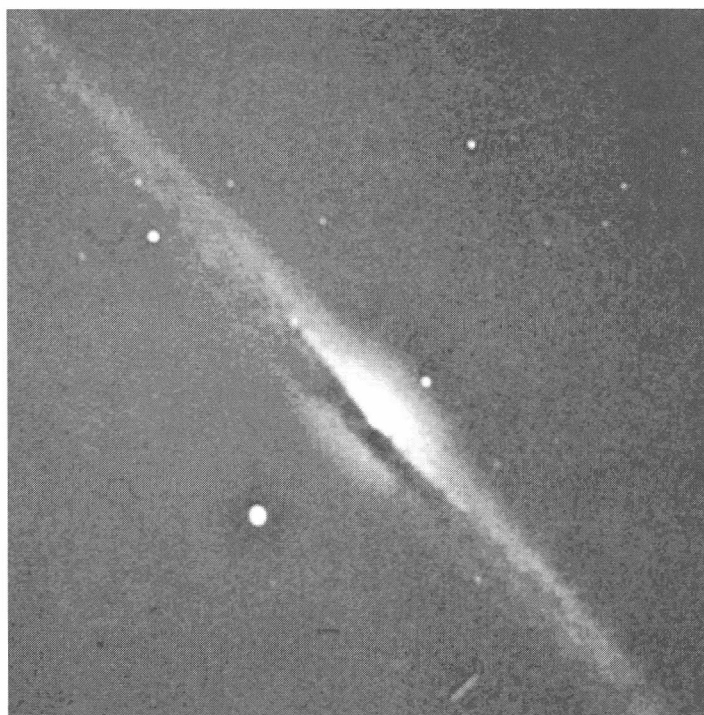


Fig. 15. Galaxia espiral NGC 4565.

Durante siglos, los astrónomos habían observado la Via Láctea como una concentración de estrellas de anchura variable y estructura ramificada que recorría un círculo máximo sobre la esfera celeste. La explicación de este fenómeno, dada por **Thomas Wright** en 1750, marcaría una nueva estructura en el dominio del Universo conocido. Para este científico, la condensación de estrellas formaba un sistema estelar, de forma lenticular, al que pertenecía el Sol. Se inicia, entonces, un recuento del número de estrellas existente en diferentes zonas del

firmamento, asociando su magnitud y posición respecto del ecuador galáctico. Nace, de esta forma, una nueva rama de la astronomía, denominada "Estadística Estelar". Puede considerarse que su fundador es William Herschel, puesto que selecciona 1088 campos de un cuarto de grado y realiza un recuento del número de estrellas que pueden observarse en cada uno de ellos. En 1784 llegaría a la conclusión de que el número de estrellas es función de la distancia a la Vía Láctea, confirmando en su publicación la teoría del "Archipiélago de Estrellas".

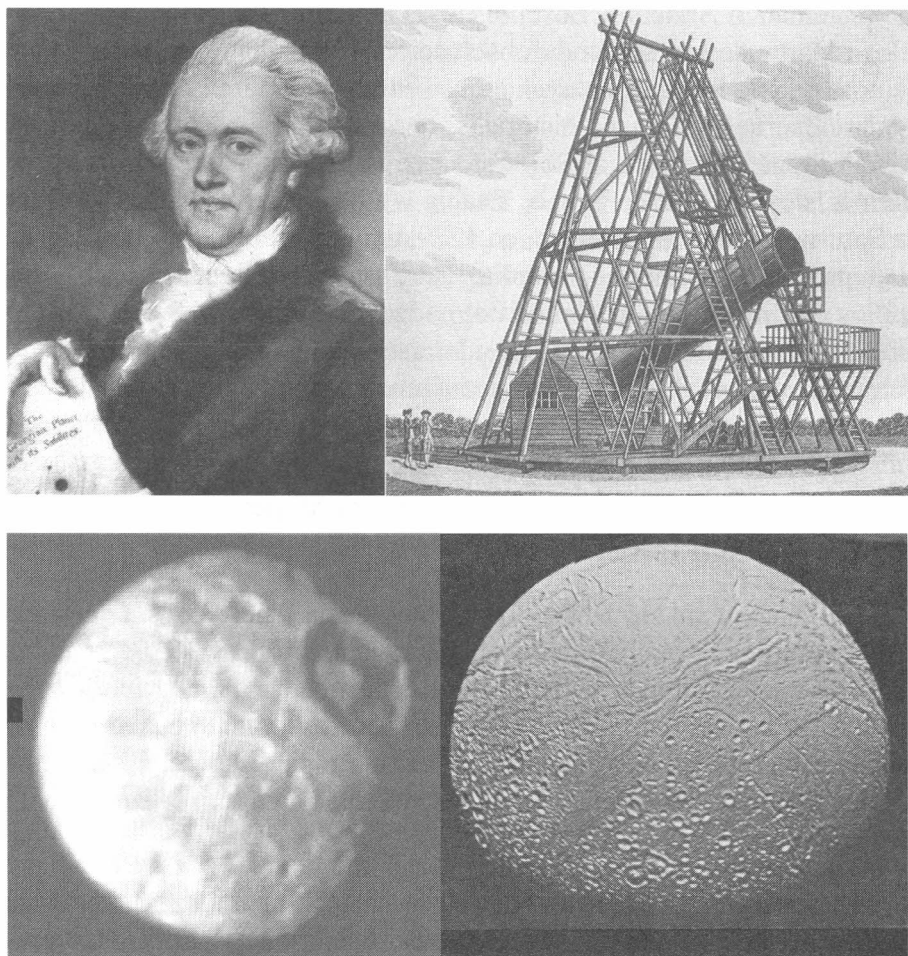


Fig. 16. Friedrich Wilhelm Herschel. y su reflector de 40 pies, construido en 1789, con el que descubre Mimas y Encelado.

El astrónomo alemán **William Herschel** (1738-1822), residente en Inglaterra, dedicó gran parte de su vida al diseño y construcción de telescopios cada vez más potentes. La exploración sistemática del cielo con dichos instrumentos, le permitió descubrir en 1781 el planeta Urano. Trabajando en el descubrimiento y catalogación de estrellas dobles, observa un nuevo objeto cuyo diámetro crece proporcionalmente a los aumentos del sistema óptico, al contrario que ocurre en las estrellas. Dado su "... curioso aspecto nebuloso", piensa, en un principio, que podría tratarse de un cometa. En consecuencia, solicita la colaboración del matemático Anders J. Lexell a fin de determinar los elementos orbitales a partir de sus series de observación. El resultado de este trabajo demostraría de forma concluyente que se trataba de un planeta, el primero descubierto en tiempos históricos, que describía una órbita prácticamente circular en torno al Sol. Este incansable observador descubriría, además, dos satélites de Urano, Titania y Oberon, en 1787, dos satélites de Saturno, Mimas y Encelado, en 1789, e innumerables estrellas. Desde el punto de vista teórico, estudia, entre otros problemas ópticos, los anillos de difracción, que limitan el poder de resolución de sus telescopios. En este sentido, puede considerársele como precursor de Airy y Schwerd que, en 1832 y 1835 respectivamente, resolverían el problema.

8. SIGLOS XIX Y XX. NACIMIENTO Y DESARROLLO DE LA ASTROFÍSICA.

En el contexto de la historia de la ciencia, suele considerarse de forma conjunta el período que se extiende entre 1780 y 1920. Se inicia con una guerra europea y finaliza con la Primera Guerra Mundial. Se caracteriza por ser un período de intenso desarrollo, tanto en astronomía y geodesia como en otros campos afines, tan rápido y diversificado que resulta imposible enumerar todos los descubrimientos realizados a lo largo de estos casi dos siglos.

Lagrange (1736-1813), al darse cuenta de la naturaleza matemática de la relación entre fuerzas y aceleraciones, introduce los métodos propios del análisis matemático en la mecánica. Nace, así, la mecánica analítica, que será desarrollada, posteriormente, por Laplace, Hamilton, Jacobi, Bruns y Poincaré, entre otros.

Gauss (1777-1855), astrónomo, geodesta y matemático, es uno de los científicos más grandes de la historia. Su campo de actividad se extiende al álgebra, donde realiza la primera demostración rigurosa del "Teorema Fundamental" enunciado en 1629 por Girard, las funciones de variable compleja, la teoría de mínimos cuadrados, de la cual es inventor junto con Legendre, la óptica geométrica, el electromagnetismo, la teoría del potencial, las representaciones conformes y la teoría de superficies, su obra fundamental. En astronomía destaca por el desarrollo de un método original de determinación de órbitas, que aún permanece vigente. Se trata, esencialmente, de un método de aproximaciones sucesivas que permite obtener los seis elementos orbitales de un cuerpo conocidas tres posiciones, observadas con un intervalo de tiempo moderado, que puede ser de tres o cuatro semanas. La validez del método quedó plenamente demostrada cuando, recién terminados sus estudios, colabora con Piazzi en el descubrimiento del primer pequeño planeta. En el trabajo *Theoria Motus Corporum Coelestium*, publicado en 1809, Gauss describe el procedimiento utilizado y el posterior ajuste de la órbita por el método de mínimos cuadrados, teniendo en cuenta el conjunto de las observaciones realizadas por Piazzi a lo largo de seis semanas. La determinación por este método de la órbita sería fundamental, puesto que la conjunción con el Sol del objeto detectado había permitido la observación sobre un arco muy corto de trayectoria. En consecuencia, los métodos clásicos no garantizaban una determinación precisa con el consiguiente riesgo de pérdida del hipotético nuevo planeta.

Coriolis (1792-1843), estudia la "Comparación de las aceleraciones adquiridas respecto de dos sistemas de referencia, uno de los cuales está en movimiento respecto del otro", trabajo que publica en 1832. Esta ley, fundamental en el movimiento relativo de un sistema de cuerpos, tiene consecuencias inmediatas en el análisis del movimiento de un cuerpo respecto de un sistema de referencia. Entre las diversas comprobaciones experimentales, destacan las realizadas por Reich (1799-1882) y Foucault (1819-1868). Ferdinand Reich demostró en 1833 que un cuerpo en caída libre a lo largo de un pozo de mina de 158 m de profundidad, situado en Freiberg (Sajonia), se desvía hacia el este 28 mm y el físico León Foucault publica en 1851 los resultados de su célebre experiencia con un péndulo de 28 Kg, suspendido mediante un hilo de acero de 67 m, realizada en el Panteón de París.

Hamilton (1805-1865), crea la óptica matemática, estudiando las leyes de propagación de los rayos luminosos. Toma la teoría ondulatoria de Huygens y la de emisión de Newton, comprobando que es válida para ambas.

Maxwell (1831-1879), estudia las ondas electromagnéticas y Fizeau (1819-1896) mide, por primera vez, la velocidad de la luz, poniendo fin a la controversia existente en el siglo XIX entre las teorías corpuscular y ondulatoria. Esta será la base para una nueva técnica: la medida electromagnética de distancias, que fue iniciada por Michelson y perfeccionada por Bergstrand y Wadley, entre otros. El trabajo de estos científicos sería esencial en el progreso de la moderna astrofísica. En particular, la obra de Maxwell *Treatise on Electricity and Magnetism*, publicada en 1873, constituye la base del estudio de los fenómenos magnéticos. En ella se expone, además, el descubrimiento de la "presión de radiación de la luz" que, proporcional a la energía incidente, es ejercida sobre la materia cuando ésta es absorbida o reflejada. En 1876 Bartoli demuestra que esta ley es una consecuencia del Segundo Principio de la Termodinámica, denominándose desde entonces *Presión de Maxwell-Bartoli*, y en 1899 Lebedev realiza la demostración experimental.

La astronomía de esta época se caracteriza por la construcción de reflectores de gran diámetro, la incorporación de la fotografía y el nacimiento y rápido desarrollo de la astrofísica.

Al considerar, en la primera mitad del siglo XIX, que es el único modo de ampliar los límites del Universo conocido, las investigaciones se centran en el perfeccionamiento de los instrumentos de observación. Se construyen telescopios de grandes dimensiones y progresa notablemente la óptica instrumental. Como mayores logros, podemos citar el diseño de los primeros objetivos acromáticos, las nuevas técnicas de plateado químico de los espejos, el estudio y minimización de los efectos térmicos y la incorporación de la montura ecuatorial dotada de sistema automático de seguimiento, realizada por Lassell en 1840. Este desarrollo tecnológico tiene como resultado la catalogación de nuevos objetos, tanto del Sistema Solar como estelares, entre los que destaca el descubrimiento de las nebulosas espirales.

La precisión alcanzada en las determinaciones angulares permitiría, además, vencer uno de los mayores obstáculos en el conocimiento del

Universo: la medida de distancias estelares. En 1838, **Friedrich W. Bessel** (1784-1846) publicaría la primera determinación de la distancia a una estrella, la 61 del Cisne. Utilizó un sencillo método trigonométrico basado en la medida de su paralaje; es decir, del desplazamiento periódico aparente que tiene su origen en el movimiento orbital de la Tierra. Casi simultáneamente, T. Henderson y F.G. Struve medirían la paralaje de Alfa de Centauro, la estrella más cercana al Sistema Solar, y Vega, respectivamente. Es de señalar, que los intentos de medir paralajes estelares habían fracasado durante más de dos siglos ya que, como afirmaba el propio Galileo en su enfrentamiento con los defensores de la teoría de Tolomeo, la lejanía de las estrellas tenía como consecuencia despla-

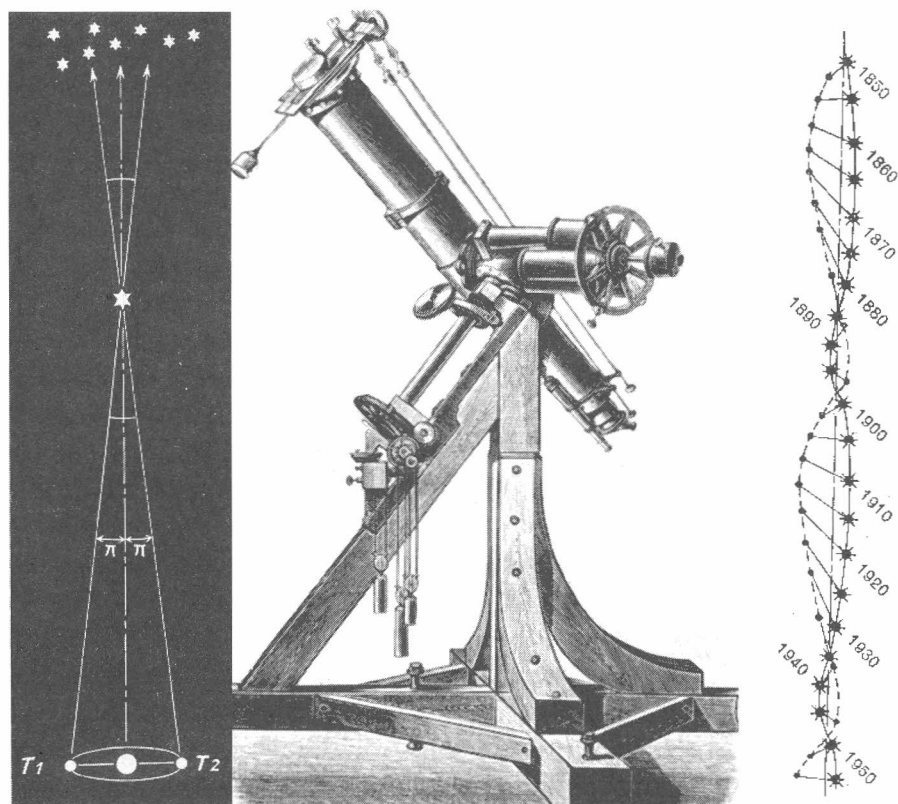


Fig. 17. Izquierda: paralaje de la 61 del Cisne, situada a 11 al. Centro: telescopio utilizado por Bessel en la determinación de la primera distancia estelar. Derecha: movimiento propio perturbado de Sirio.

zamientos de tan pequeña magnitud que no podían ser medidos con los instrumentos de la época.

A Bessel se debe, también, el desarrollo en 1844 de un método matemático para la detección de compañeros invisibles en sistemas estelares múltiples. Basado en el análisis del movimiento propio perturbado de ciertas estrellas o sistemas visuales, condujo al descubrimiento de la compañera de Sirio. Peters calculó en 1851 su órbita teórica y en 1862 sería descubierta por Alvan Clark en la posición prevista.

Los avances tecnológicos fueron unidos a un progreso notable en astronomía de posición. A partir de las observaciones realizadas en los observatorios de Pulkovo y Greenwich, principalmente, se establecen Sistemas Fundamentales de Referencia, donde es necesario hacer mención especial al trabajo de Auwers, publicado en 1879, base del sistema convencional actual. Continuaría, así mismo, la elaboración de catálogos y mapas estelares, la obtención de valores precisos de la constante de precesión (Bessell, 1815 y 1818; Struve, 1842; Newcomb, 1898) y las determinaciones del apex solar (Argelander, 1830 y 1862; Struve, 1842; Airy, 1860; Kempf, 1892), problema ya planteado por Lambert en 1761.

Aunque existen numerosos trabajos previos en el campo de la fotometría, que se remontan a Hiparco y Tolomeo, continuándose a lo largo de los siglos con autores como al-Sufi, Tycho Brahe, Johann Bayer o Galileo, es John Herschell (1792-1871) quién enuncia en 1830 que "la progresión aritmética de las magnitudes está asociada a la progresión geométrica del brillo aparente de las estrellas, de forma que el cociente entre los brillos de dos estrellas que difieren en una magnitud es próximo a 2.5". Nacería, de esta forma, la fotometría moderna. En 1856, Pogson determinaría este cociente con mayor precisión. Establece, además, el cero de la escala de forma que se asegure la continuidad con los catálogos primitivos. Así mismo, es de destacar que, aunque los primeros fotómetros datan del siglo XVIII, a partir de 1830 se diseñaron numerosos instrumentos, tanto para fotometría visual como fotográfica.

La descomposición de la radiación compleja solar mediante un prisma había sido realizada por Newton en 1666. Sin embargo, es Wollaston el que, al considerar un foco en forma de rendija, obtendrá en 1802 una imagen virtual del espectro solar en el que se aprecian siete

líneas oscuras. Posteriormente, Fraunhofer transformaría en 1814 estas imágenes virtuales en reales, al interponer una lente entre el prisma y la pantalla receptora. La nitidez de la imagen obtenida le permitió detectar un centenar de líneas espectrales. A este autor se debe, así mismo, el descubrimiento de la coincidencia entre las líneas del espectro solar y las correspondientes a elementos terrestres, al identificar la línea D con el sodio. Finalmente, Bunsen y Kirchhoff establecerían en 1859 la diferencia entre espectros de absorción y emisión y, en consecuencia, el origen de las líneas de Fraunhofer en relación con las características térmicas de la atmósfera solar. Este descubrimiento marca el nacimiento de la astrofísica, al extender el dominio de la astronomía tradicional con el concurso de la física teórica y experimental.

El rápido progreso de la espectroscopía ha permitido obtener información fundamental sobre la constitución y estado de las diversas fuentes de emisión. Constituye, además, la base para la medida de la velocidad radial, en virtud de la ley enunciada por Doppler en 1842 y Fizeau en 1848, mediante la cual se han determinado rotaciones planetarias y movimientos relativos.

La primera fotografía astronómica de la que se tiene conocimiento fue realizada por John William Draper que, en marzo de 1840, obtiene una imagen de la Luna mediante la técnica inventada por Daguerre y Niepce poco tiempo antes. En 1845, Foucault y Fizeau obtienen un daguerrotipo del Sol y cinco años más tarde George P. Bond y John A. Whipple impresionan la primera imagen de una estrella. Con estas experiencias se considera, generalmente, que comienza la historia de la fotografía astronómica. Sin embargo, puesto que los elementos esenciales de toda cámara fotográfica son el objetivo, la cámara oscura y la placa fotográfica sensible a la luz, debemos remontarnos al siglo X de nuestra era, para hacer mención de la primera referencia que se tiene de la utilización de una cámara oscura. Corresponde a Alhazen de Basra (965-1038), astrónomo árabe al que se deben numerosas contribuciones originales en el campo de la óptica, que la utilizaba para observar el Sol durante los eclipses. Existen, también, referencias de un dispositivo similar en la obra de León Battista Alberti (1404-1472), Leonardo da Vinci (1452-1519) y Giovanni Battista della Porta (1536-1605). Este dispositivo óptico-mecánico, facilitó en gran medida la elaboración de

mapas estelares, el seguimiento de los eclipses solares, la cartografía de la Luna y el estudio de la evolución de las manchas solares, entre otras observaciones astronómicas. A partir de este momento, las investigaciones se encaminaron a la búsqueda de un medio que permitiera fijar las imágenes producidas en la cámara oscura. La solución del problema se encontró en la propiedad de numerosas sustancias, entre las que destacan las sales de plata, de reaccionar en contacto con la luz (J.H. Schülze, 1727; J.N. Niepce, 1813; I.Niepce y L.J. Daguerre, 1839; W.H. Fox-Talbot, 1840; etc.). Superado el problema de obtener un negativo reproducible, la historia del proceso fotográfico estaría ligada al perfeccionamiento de los materiales fotosensibles.

La aplicación del proceso fotográfico a las investigaciones astronómicas impulsó de forma espectacular el desarrollo de esta ciencia, al abrir nuevos campos de estudio. Las incuestionables ventajas de este método son, esencialmente, la posibilidad de lograr imágenes de objetos poco luminosos, mediante exposiciones adecuadas, que la observación visual no habría podido detectar, su condición de registro perdurable, que puede ser estudiado de forma exhaustiva, y una única placa puede contener información sobre miles de estrellas, reduciendo los tiempos de observación. Una característica fundamental es, asimismo, la propiedad que poseen las emulsiones de ser sensibles a zonas muy alejadas del espectro visible, que permitió descubrir y estudiar objetos y fenómenos inaccesibles en la observación visual. Esta extensión del espectro se debe a Voguel que, en 1873, descubre que al agregar un colorante a la emulsión de bromuro de plata, la placa fotográfica se sensibilizaba a la región del espectro que era absorbida por el colorante. De esta forma, seleccionando y combinando los colorantes agregados a la emulsión, es posible cubrir el espectro electromagnético desde la región de los rayos Y y X hasta la radiación infrarroja de casi 13000 angstrom. Al mismo tiempo, se descubre que, mientras el ojo humano integra toda la radiación recibida, los materiales utilizados en esta técnica pueden ser selectivos, permitiendo observaciones monocromas en diferentes longitudes de onda.

La facultad que poseen las emulsiones de ser selectivas, revolucionaría el estudio de la atmósfera solar, al permitir observar aisladamente las dis tintas regiones. Otro paso decisivo fue la utilización de la fotografía en el infrarrojo, que ha permitido atravesar las atmósferas de Venus y Marte, en rayos X y en ultravioleta. Estas dos últimas, serían utilizadas

en la segunda mitad del siglo XX para la observación desde vehículos espaciales.

Al generalizarse la fotografía astronómica, fue necesario diseñar instrumentación astrofotográfica específica, esencialmente diferente de la visual, ya que debe producir imágenes nítidas sobre todo el área de la placa. Además, la región del ultravioleta que, teóricamente, podía ser observada desde la superficie terrestre estaba limitada por la no transparencia de las lentes a esta banda del espectro y por la deficiente reflectividad de los espejos. Este problema persistiría largo tiempo, ya que hasta 1930 no se desarrollarían revestimientos reflectores adecuados para los espejos de los telescopios.

El desarrollo de la técnica fotográfica eliminó las limitaciones de la espectroscopía visual, al reducir las largas series de observación a una simple exposición. Esta ventaja, unida a la invención de un instrumento de baja absorción construido en cuarzo y espato por Huggins en 1875,

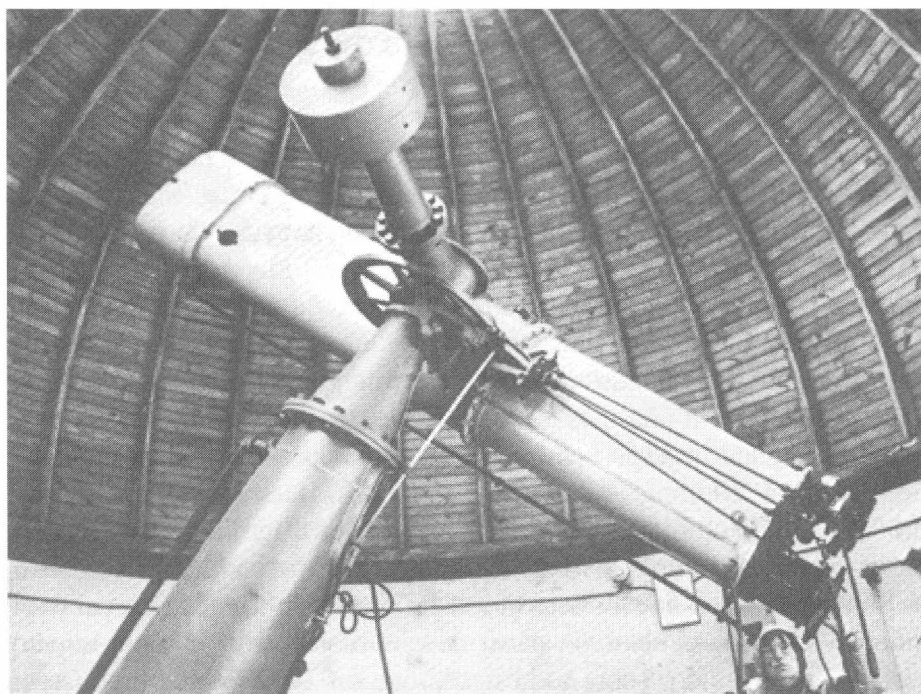


Fig. 18. Astrógrafo del observatorio de Pulkovo.

permitiría a E.C. Pickering elaborar en 1885 el primer catálogo general de espectros estelares. Simultáneamente, permitió la medida del efecto doppler, imposible en espectroscopía visual. Con su aplicación, Pickering descubriría en 1890 las estrellas dobles espectroscópicas, al observar el desdoblamiento periódico de las líneas espectrales e interpretarlo como un efecto del movimiento orbital del sistema.

La influencia de la fotografía alcanzó, también, otros campos científicos, entre los que destacan la astrometría y la fotometría fotoeléctrica. Una de las empresas de mayor embergadura emprendidas en este siglo, sería la elaboración de un "Mapa Fotográfico General del Cielo", en la que colaboraron 18 observatorios distribuidos en los dos hemisferios del planeta.

En el ámbito de la exploración y estudio del Sistema Solar, es necesario citar el descubrimiento de los planetas Neptuno (1846) y Plutón (1916), mediante la aplicación de las leyes de la mecánica celeste, numerosos satélites y, desde que en 1801 Piazzi descubre Ceres, infinidad de asteroides.

Según la Ley de Bode, entre Marte y Júpiter debería existir un planeta situado a una distancia media teórica de 2.8 ua. Sin embargo, diversos programas de observación sistemática habían sido infructuosos durante muchos años. Sería Piazzi, en el observatorio de Palermo, quién en 1801 descubriría el primer pequeño planeta. La órbita de este cuerpo, denominado Ceres, fue determinada por Gauss como ya indicamos anteriormente, obteniendo un valor del semieje mayor muy próximo al dado por Bode. Un año más tarde, el 28 de marzo de 1802, Olbers descubre un segundo cuerpo menor, Pallas, a una distancia casi idéntica del Sol. En 1804, Harding observa Juno y en 1807, también Olbers, descubre Vesta. Este último, es el más brillante de los asteroides, siendo posible observarlo a simple vista en las oposiciones favorables. Hasta 1845 no se descubrieron nuevos asteroides. En esta fecha Hencke descubre el quinto y en 1847 el sexto. A partir de este momento el descubrimiento sería ininterrumpido, sobre todo desde que en 1892 Wolf introduce el método fotográfico, que actualmente sigue aplicándose aunque con diferentes variantes.

El planeta Neptuno no fue descubierto mediante observación, sino a través de los cálculos matemáticos de dos astrónomos: Le Verrier (1811-1877), profesor de la Escuela Politécnica de París, y Adams, del observatorio de Cambridge. Es de señalar, que un año antes de que Le Verrier publicara sus resultados, Adams había obtenido ya los elementos orbitales del hipotético nuevo planeta, pero su memoria fue desestimada por su director G. Airy. El proceso seguido, casi idéntico, consistía esencialmente en el análisis del movimiento perturbado de Urano, cuyos residuales eran interpretados por la acción de una masa perturbadora externa. Dado que el problema matemático presenta infinitas soluciones, se supuso la coincidencia de los planos orbitales y un valor de 388 para el semieje mayor de su órbita elíptica media alrededor del Sol, dado por la serie de Bode. Una vez resueltos sus cálculos, Le Verrier anunciaría en 1846 que el planeta podría observarse a 5° de la estrella delta de Capricornio. Efectivamente, tres semanas más tarde era descubierto por Galle en el Observatorio de Berlín. Una vez reconocida internacionalmente su existencia, se determinaron sus elementos orbitales a través de la observación precisa, encontrándose que la distancia media al Sol era solo de 301, por lo que la Ley de Bode se verifica solo de forma aproximada.

Una vez descubierto Neptuno, Le Verrier realizó un estudio del movimiento de Mercurio, encontrando en él numerosas anomalías. Las atribuye a las perturbaciones originadas por uno o más planetas interiores, que resultarían prácticamente invisibles a la observación en virtud de su pequeña masa y proximidad al Sol. La exploración de esta región del cielo en búsqueda del planeta fue infructuosa durante muchos años. Sin embargo, se observaron numerosos tránsitos de pequeños cuerpos, que hicieron pensar a Le Verrier que sus conclusiones eran ciertas. Selecciona, entonces, una larga serie de tránsitos que parecen pertenecer al mismo cuerpo, determina un conjunto de órbitas que pudieran satisfacerlos y, de entre ellas, elige la que parece más probable. Al hipotético planeta intramercuriano le denominó, un poco prematuramente, "Vulcano", estableciendo que debería tener un período de revolución de 33 días y una órbita muy inclinada. Al igual que en el caso de Neptuno, anunció un paso por delante del disco solar para una cierta fecha, pero nunca se produjo. Ya en el siglo XX, se comprobaría que los tránsitos anunciados pertenecían a asteroides, de órbitas tan elípticas que llegan a intersectar la órbita de Mercurio, como es el caso de Icaro.

No podemos terminar el siglo XIX sin hacer mención del descubrimiento de los satélites de Marte: Fobos y Deimos, denominados como los dos hijos de Ares, Marte en la mitología romana, que conducían el carro del dios de la guerra. Estos dos pequeños cuerpos, fueron "inventados" por Kepler casi tres siglos antes de que fueran observados. Este gran astrónomo del siglo XVII creía en un universo simétrico, por lo que, dado que la Tierra poseía un satélite y Júpiter cuatro, recordemos que únicamente eran conocidos los satélites galileanos, Marte debería tener dos para que se verificara la sucesión de duplicidades. A pesar de la observación continuada del planeta, no se detectaron hasta que, en 1877, Asaph Hall, observador riguroso y perseverante, que disponía de uno de los mejores refractores de la época, descubre dos pequeñas manchas móviles, poco luminosas y muy próximas a Marte, durante una oposición muy favorable. El motivo de que se tardara tanto tiempo en descubrirlos, se debe, precisamente, a su pequeño tamaño y a su proximidad a Marte que, con su luz difusa, dificulta la observación. Aunque este fue el descubrimiento más sorprendente de satélites, no fue el único, ya que el conocimiento de los sistemas de Júpiter, Saturno y Urano se ampliaría notablemente (Ariel y Umbriel, Lassell 1851; Amaltea, Barnard 1892; Febe y Temis, Pickering 1898 y 1904; etc.).

Los resultados obtenidos en el campo de la astronomía fundamental, como consecuencia del perfeccionamiento de los instrumentos de observación, impulsa la construcción de grandes telescopios a lo largo de las primeras décadas del siglo XX. Las placas fotográficas y los espectros, obtenidos de forma sistemática, dieron lugar a importantes descubrimientos, tanto estelares como planetarios. Además, los métodos específicos de observación solar, desarrollados a partir de 1904, harían resurgir la heliofísica, rama de la astronomía fundada por Cristóbal Scheiner en el siglo XVII.

En 1905, E. Hertzsprung descubre dos tipos diferenciales de estrellas: enanas y gigantes. En 1910, H.N. Russell estudia la distribución de la luminosidad de las estrellas en función de su tipo espectral, que sería representada gráficamente por el mismo autor en 1913. Este diagrama, conocido con el nombre de Hertzsprung-Russell, constituye un pilar fundamental en el estudio de la evolución estelar.

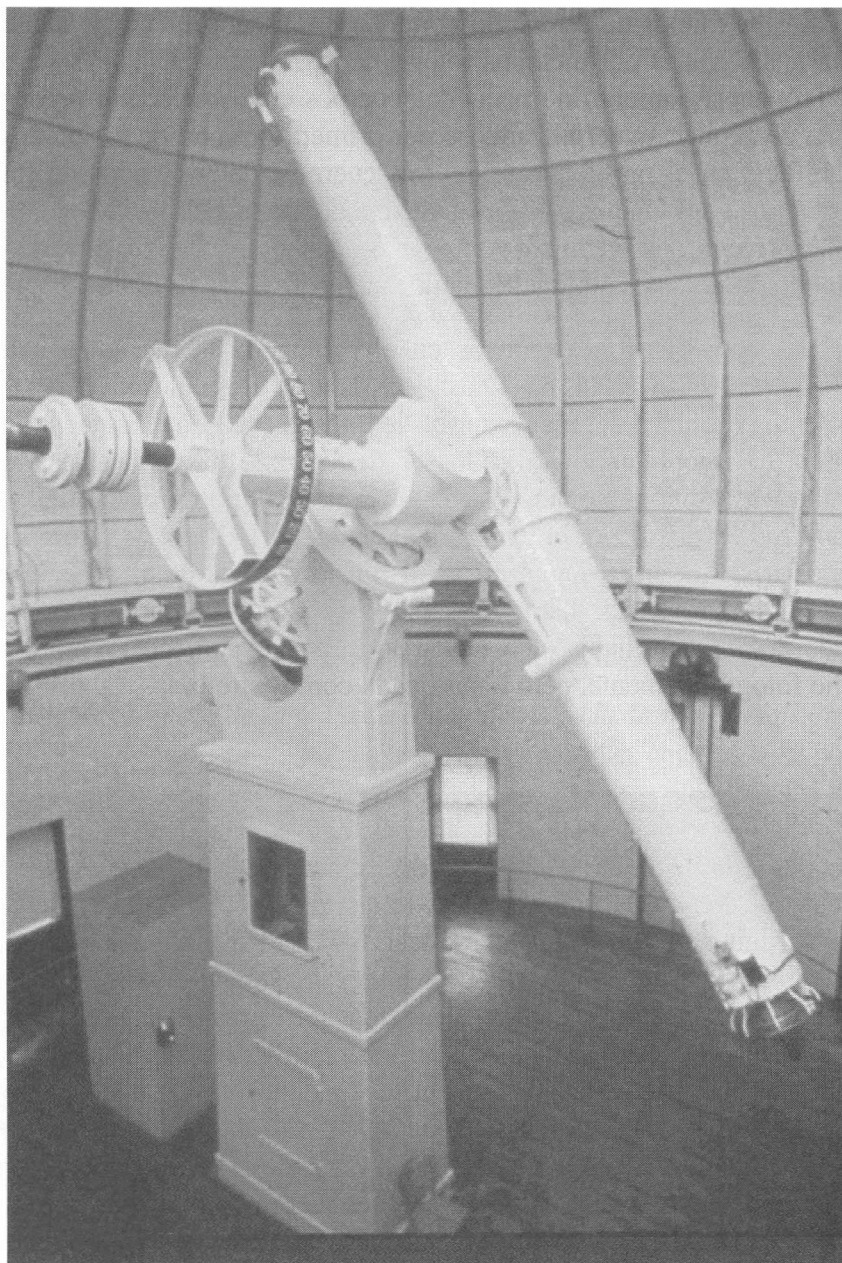


Fig. 19. Telescopio refractor del Observatorio de La Marina (Washington) utilizado por Asaph Hall en el descubrimiento de Phobos y Deimos en 1877.

En los inicios de este siglo continúa el descubrimiento y catalogación de asteroides por métodos fotográficos. Así, en 1906, se descubren los Troyanos, conjunto de pequeños cuerpos cuyo baricentro recorre la órbita de Júpiter, materializándose por primera vez uno de los puntos de estabilidad en el problema de los tres cuerpos, determinados de forma teórica por Lagrange en 1772. Antecediendo al planeta, sería encontrado posteriormente un segundo grupo, "los Griegos", materializando el segundo punto de estabilidad orbital.

Las investigaciones teóricas en el campo de la mecánica celeste realizadas por Lowell (1855-1916), le conducen a establecer en 1915 los elementos orbitales del más exterior de los planetas. La existencia de un planeta transneptuniano no pudo ser demostrada hasta después de su muerte, ya que la exploración sistemática de la región prevista del espacio no fue coronada por el éxito. Finalmente, en 1930, Clyde Tombaugh descubriría Plutón mediante observación fotográfica en el observatorio que el propio Lowell había fundado con este fin. Como curiosidad, puede decirse que había sido observado numerosas veces, tanto visual como fotográficamente, pero identificado como estrella.

9. LA ASTRONOMÍA EN LA ÉPOCA ACTUAL

Desde la Segunda Guerra Mundial, el ritmo de los avances tecnológicos y de los descubrimientos, en todos los campos de la ciencia, ha sido vertiginoso. En primer lugar, nace la radioastronomía, como resultado de las investigaciones sobre las ondas hertzianas, en sus dos principales aplicaciones: el enlace de estaciones terrestres mediante ondas de radio y el radar, encaminado en su primera época a fines militares.

La primera observación de ondas de radio extraterrestres, procedentes del centro de nuestra Galaxia, fue realizada por Karl Jansky en 1931 durante un enlace entre Inglaterra y Estados Unidos, en una longitud de onda de 14.7 m. Sus observaciones fueron continuadas por Grote Reber que, en 1939, construye el primer radiotelescopio y obtiene un mapa de la radiación radio galáctica. Durante la segunda guerra mundial, J.S. Hey y G.C. Southworth observan las emisiones del Sol en la banda de radio, tanto térmicas como procedentes de las erupciones cromosféricas, y en 1946 A.E. Corington inicia el análisis sistemático de la radia-

ción centimétrica solar. Con estos descubrimientos, se abriría una nueva ventana en el espectro de las radiaciones electromagnéticas observadas desde la superficie terrestre.

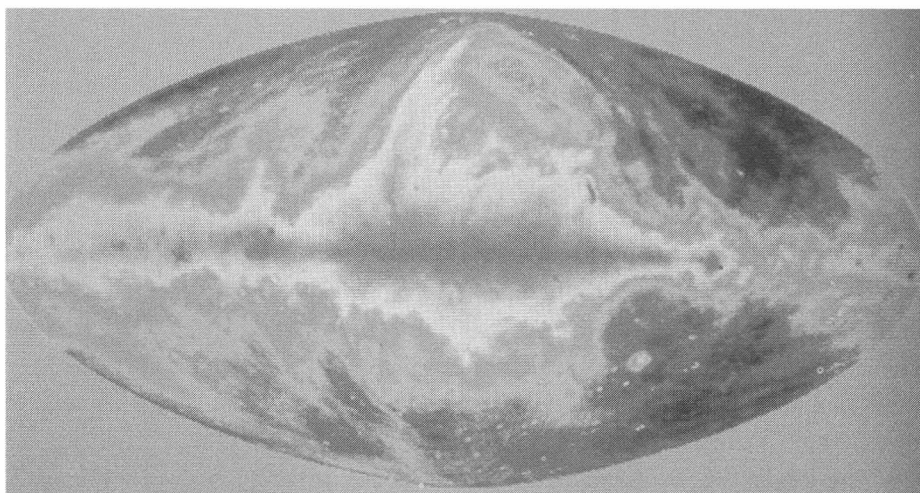


Fig. 20. Mapa radio de la Galaxia obtenido por Haslam en Jodell Bank.

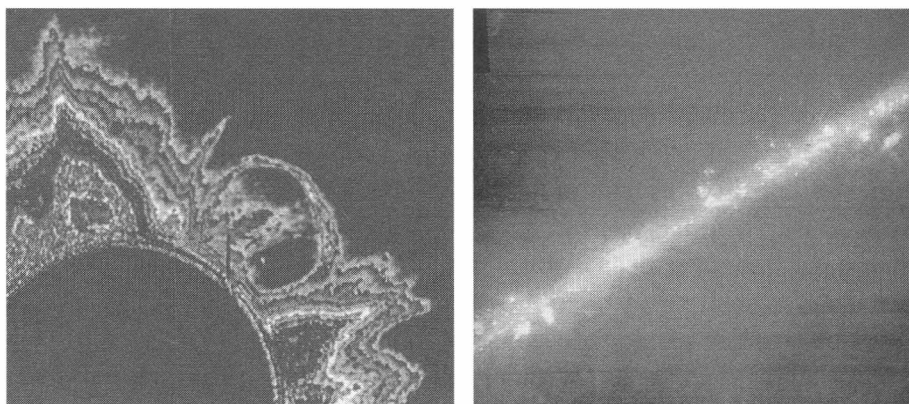


Fig. 21. Izquierda: Figuras coroneales registradas en 1980 por el satélite de la Misión del Máximo Solar. Derecha: Imagen del centro de la Galaxia obtenida con el telescopio espacial de infrarrojo instalado a bordo del IRAS.

La radioastronomía alcanzaría una nueva dimensión con el estudio de la emisión del hidrógeno neutro en la línea de 21 cm, predicha por van de Hulst en 1944 y observada , casi simultáneamente en 1951 por equipos holandeses, americanos y australianos, en los que figuraban J.H. Oort y J.C. Kerr, entre otros. Aportaría el medio esencial para el conocimiento de la estructura y movimiento de los brazos espirales y de la condensación central.

Unidas a estos descubrimientos, otras identificaciones, como la radiofuente del Cisne en 1953, de origen extragaláctico, el primer cuasar en 1963, consistente en una radiofuente extremadamente intensa en coincidencia con un objeto óptico de aspecto estelar, la radiación de fondo en 1966 o la detección realizada en 1968 por A. Hewish y S.H. Bell de un púlsar, inician un proceso que permitiría descubrir la existencia de objetos que hasta aquel momento habían pasado desapercibidos. Estas técnicas, posibilitaron, además, la observación de objetos ya familiares bajo una perspectiva diferente. En consecuencia, mediante la observación radio, se ampliaron los límites del universo observable.

La incorporación de nuevas tecnologías no interrumpe la evolución de los métodos clásicos. Así, el 2 de julio de 1978 James W. Christy descubre la presencia de Caronte durante una serie de observaciones fotográficas de Plutón, realizadas desde el USNO con el objetivo de perfeccionar los elementos orbitales de este planeta. Detectado como un abultamiento de su imagen, que varía su posición con un período próximo a seis días al producirse, en virtud del movimiento relativo, ocultaciones y tránsitos, es interpretado correctamente como un satélite. De difícil observación en virtud de su lejanía, sus elementos orbitales y principales características físicas han sido sucesivamente refinadas por métodos fotométricos y espectroscópicos. Actualmente, podemos concluir que, aunque catalogado como el único satélite de Plutón, en realidad el sistema debería ser considerado como un planeta doble, en virtud de la estructura de ambos cuerpos y de la relación de tamaños.

Otro grave inconveniente salvado en los últimos años ha sido la atmósfera terrestre, al iniciarse, con el lanzamiento del "Sputnik I" el 4 de octubre de 1957, la denominada "Era Espacial". A partir de esta época, se ponen en órbita telescopios sensibles a los rayos X, ultravioleta

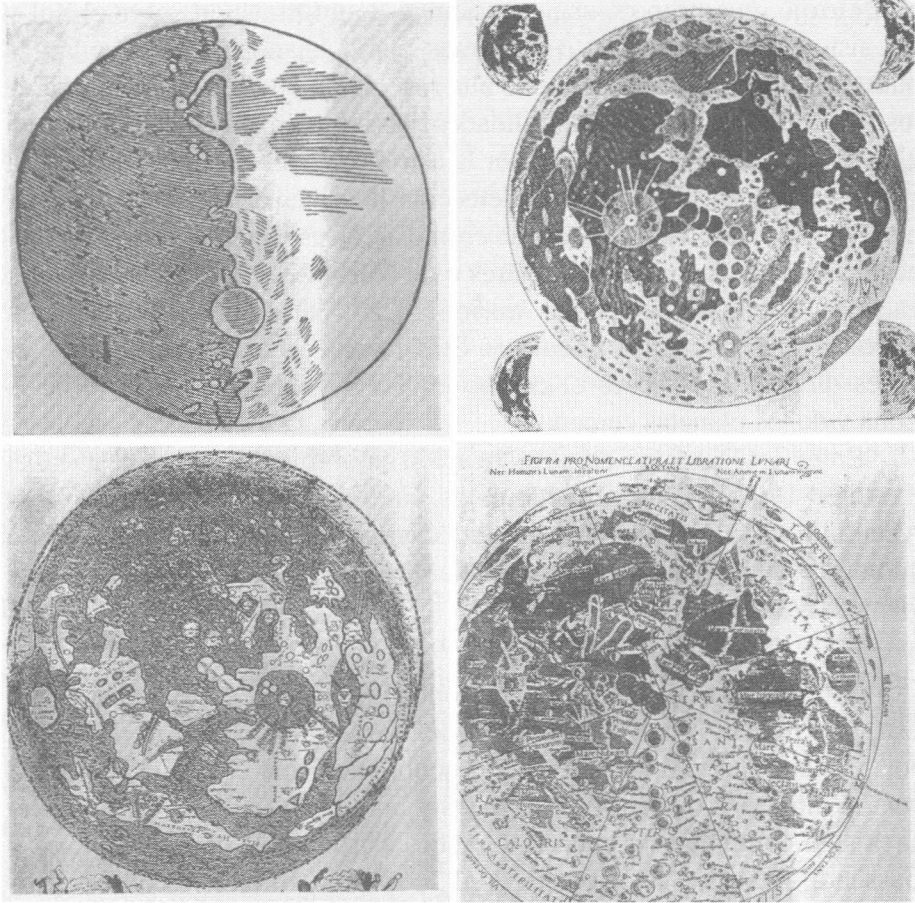


Fig. 22. Mapas lunares de Galileo (1610), Hevelio (1647), Riccioli (1651) y Keill (1718).

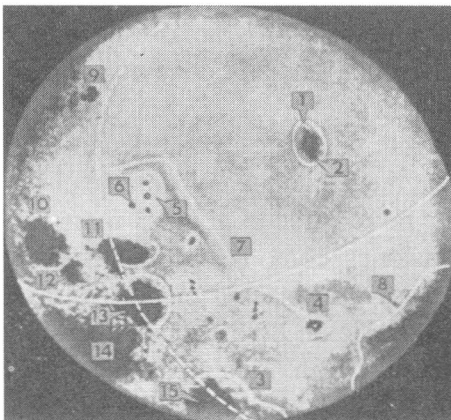


Fig. 23. A la izquierda de estas líneas, la primera imagen de la cara "oculta" de la Luna tomada por la sonda Orbitnik en 1959.

e infrarrojo, que proporcionan un diluvio de información sobre el Sol y los sistemas estelares, tanto próximos como lejanos. En particular, la puesta en órbita del telescopio de alta resolución Hubble en la década de los 90 ha abierto nuevas posibilidades, casi ilimitadas, en el estudio del Universo, renovando el interés por la astronomía en el mundo científico. Entre sus logros se cuentan: la detección de sistemas planetarios próximos, la obtención de espectros de cromosferas estelares y nítidas imágenes de núcleos de cúmulos estelares o de colisiones e interacciones entre galaxias. Además, numerosas misiones, han permitido la observación próxima de los distintos miembros del Sistema Solar, e incluso algunas veces directamente sobre el cuerpo en estudio, como es el caso de la Luna y de los planetas cercanos.

Entre los satélites de investigación en órbita terrestre destaca el Explorer 1 (1958), que descubre los cinturones de radiación de Van Allen. Provisto de instrumentos adecuados, el Explorer 4 estudiaría durante tres meses su estructura, al tiempo que mide la velocidad de los vientos ionosféricos.

La Luna es el más próximo de todos los cuerpos del Sistema Solar. Esta proximidad relativa ha hecho que, desde que Galileo la observara por primera vez con su anteojo, descubriendo una superficie formada por "... inmensos desiertos, altos picos y numerosos cráteres", su estudio haya sido continuado e intenso. Grandes astrónomos, como Peiresec y Gassendi, Hevelio, Riccioli o Keill, centrarán en ella sus observaciones, al igual que Galileo en 1610, dibujando los primeros mapas lunares. En la actualidad continúa el interés por nuestro satélite, motivo por el cual ha sido, y está siendo, objeto de numerosos programas espaciales, tanto rusos como americanos. Destaca la sonda Lunik 3, conocida con el nombre de Orbitnik, que fotografía por primera vez la cara oculta a 64000 Km de distancia el día 6 de octubre de 1959, descubriendo una estructura superficial esencialmente diferente, en la que únicamente el 10 % está recubierta de pequeñas cuencas, no existiendo grandes mares si exceptuamos el mar de Moscú. Otras misiones, como las Orbiter, Surveyor, Ranger o Apollo, aportarán numerosa información científica, que culmina con el hombre en la Luna, la instalación de estaciones permanentes y el retorno de materiales lunares ala Tierra. Finalmente, es necesario nombrar la misión Clementine, lanzada el 25 de enero de 1994, ya

que las técnicas utilizadas han permitido una perfecta cartografía global, incluyendo las regiones polares, y un preciso mapa gravimétrico.

La única misión que ha realizado una aproximación a Mercurio ha sido la Mariner 10, lanzada en 1973. Tuvo tres encuentros con el más interior de nuestros planetas entre 1974 y 1975, a intervalos de 176 días, duración del día solar de Mercurio como muestran los ángulos de iluminación idénticos de las imágenes. Confirma el período de rotación obtenido mediante observación radar desde la Tierra, estudia el campo magnético y envía más de 7000 fotografías, aunque desgraciadamente recubren únicamente el 40 % de su superficie y poseen resoluciones efectivas máximas de 450 m.

La exploración de los planetas Marte y Venus ha sido objetivo de incontables programas espaciales, al tratarse de los dos planetas más próximos a la Tierra.

En el estudio de Venus, de difícil observación desde la Tierra, podríamos destacar la Mariner 2 (1962), primera nave espacial que orbita otro planeta, las Venera 9 y 10 (1975), que obtienen las primeras y únicas fotografías del suelo, las Pioneer Venus 1 y 2 (1978), que estudian la interacción de la atmósfera con el viento solar y realizan una cartografía radar del 93 % de la superficie con una resolución de 200 m, y la misión Magellan que, entre 1990 y 1994, refinaría la cartografía radar con resoluciones efectivas de solo 120 m, proporcionando una valiosa información sobre la estructura superficial, que parece estar afectada por ciclos de actividad global.

Las primeras observaciones telescópicas de Marte fueron realizadas por Galileo en 1610. Francesco de la Fontana realizó en 1636 un croquis en el que aparece una mancha oscura. En 1659, Huygens realiza un dibujo en el que se distinguen zonas claras y oscuras que coinciden con estructuras superficiales hoy conocidas. En la segunda mitad del siglo XVII, Cassini, Hooke y otros astrónomos determinan su período de rotación. En 1840, Beer y Mädler publican el primer mapa global. En 1869 el padre Secchi realiza una descripción en la que destacan líneas oscuras que denomina "canales". Finalmente, en 1877 Schiaparelli realiza una serie de observaciones de tal calidad, que le permiten confeccionar mapas cuya nomenclatura sigue hoy vigente. Desde entonces, este planeta ha sido el mejor estudiado del Sistema Solar, ya que su órbita inmediatamente exterior a la Tierra, permite observarlo muy próximo y

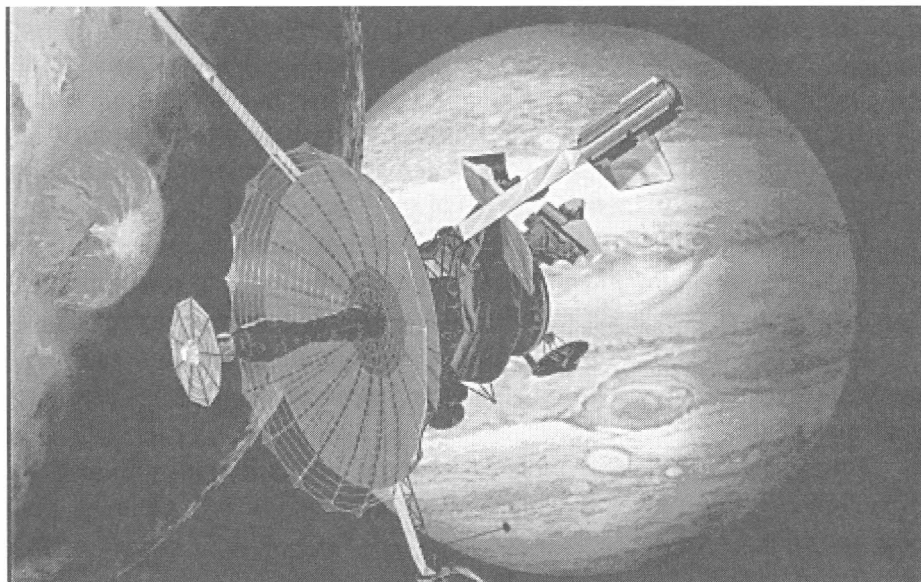


Fig. 24. La sonda Galileo aproximándose al planeta Júpiter. Superposición de imágenes, NASA 1995.

en oposición con el Sol. Además, ha sido objeto de numerosas expediciones, pertenecientes, principalmente, a las misiones Mariner (1965-1969), que envían las primeras fotografías en órbita marciana, Mars (1971-1974), que estudian su atmósfera y su superficie, demostrando que en la evolución del planeta se aprecia tectonismo, volcanismo, craterización por impacto, erosión eólica y por fluidos, y Viking, que desde 1976, tras realizar el descenso e instalar estaciones permanentes, han enviado innumerables datos sobre análisis de materiales, temperaturas, vientos, composición de la atmósfera, radiación solar, etc.

En la exploración de las regiones exteriores de nuestro sistema, destacaremos por su relevancia los Pioneer 10 y 11 (1972-1973) y las misiones gemelas Voyager 1 y 2, lanzadas en 1977, que han estudiado el cinturón de asteroides y los planetas jovianos (Júpiter, 1979; Saturno, 1981; Urano, 1985; Neptuno, 1989). Descubren al menos 11 satélites, el anillo de Júpiter, el décimo anillo de Urano, tres anillos principales, formados por arcos parciales, de Neptuno, estudiando, además, el campo magnético y los cinturones de radiación, sumamente intensos, de estos planetas.

Finalmente, la misión Ulysses ha supuesto un progreso significativo en la exploración del Sol y del medio interplanetario, al analizar, tras su encuentro con Júpiter en 1992, el viento solar, los rayos cósmicos y la estructura del campo magnético solar e interplanetario, desde fuera del plano de la eclíptica, ya que su trayectoria le ha situado, por primera vez en la historia, en las regiones polares norte (1994) y sur (1995) del Sol.

A lo largo de esta síntesis, hemos revisado la evolución desde sus orígenes de una ciencia tan compleja y diversificada como es la astronomía. Es evidente, que el desarrollo actual, caracterizado por un crecimiento casi exponencial, deriva de avances teóricos, metodológicos e instrumentales realizados en las últimas décadas, pero es también, inquestionablemente, consecuencia de la acumulación y transmisión de conocimientos a lo largo de milenios.

BIBLIOGRAFÍA

- Aubert, M.E., Lull, V., Sanahuja, E., Folch, D.:** *Orígenes del hombre y de la civilización*. Historia Universal, vol. 1. Planeta. Barcelona, 1992.
- Bateman, E., McLean, M.:** *Solar System Exploration*. Scien. Artwork Comp., 1987.
- Berry, A.:** *A short history of Astronomy*. Dover. New York, 1961.
- Biot, J.B.:** *Études sur l'astronomie indienne et sur l'astronomie chinoise*. Albert Blanchard. Paris, 1969.
- Caballos, A., Serrano, J.M.:** *Sumer y Akkad*. Historia del Mundo Antiguo, vol 1. Akal. Madrid, 1988.
- Crombie, A.C.:** *Historia de la Ciencia: de San Agustín a Galileo*. 2 vols. Alianza Univ. Madrid, 1974.
- Chang et. al.:** *El Universo*. Ed. Sarpe. Madrid, 1982.
- Delambre, M.:** *Histoire de l'astronomie ancienne*. Vol. 2. Johnson Rep. Corp. New York, 1965.
- Deutsch, A.J. (Ed.):** *Space Age Astronomy*. Academic Press. NY, 1962.
- Dicks, D.R.:** *Early Greek Astronomy to Aristotle*. Thames and Hudson. Bristol, 1970.
- Dreyer, J.L.E.:** *A history of astronomy from Thales to Kepler*. Dover. New York, 1953.

- Due Rojo, A.:** *El fundador de la Heliofísica*. CSIC. Serie A. Año IV, 15. Tarragona, 1950.
- Fontana, J., Ucelay-Da Cal, E.:** *Nacimiento de los nuevos mundos*. Historia Universal, vol. 3. Planeta. Barcelona, 1992.
- Garbers, K.:** *La Matemática y la Astronomía en la Edad Media*. Instituto Jorge Juan. CSIC. Madrid, 1954.
- Gauss, C.F.:** *Theoria Motus Corporum Coelestium (Hamburgi, 1809)*. Culture et Civilisation. Bruxelles, 1968.
- Hemleben, J.:** *Galileo*. Salvat. Barcelona, 1985.
- Kramer, S.N.:** *From the tables of Sumer*. Falcon's Wing Press. Colorado, 1965.
- Kepler, J.:** *Abrégé d'Astronomie Copernicienne* (Trad. Jean Peyroux). Blanchard. Paris, 1988.
- Krupp, E.C. (Ed.):** *In search of ancient astronomies*. Doubleday. New York, 1977.
- Liller, W. (Ed.):** *Space Astrophysics*. McGraw-Hill. New York, 1961.
- Neugebauer, O.:** *A history of ancient mathematical astronomy*. 3 vols. Springer-Verlag. Berlin, 1975.
- Newton, I.:** *Principios matemáticos de la filosofía natural*. Altaya. Barcelona, 1997.
- Newton, I.:** *El sistema del mundo*. Sarpe. Madrid, 1983.
- Page, T., Page, L.W. (Eds.):** *Space Science and Astronomy*. Macmillan Pub. New York, 1976.
- Piñero, A.:** *La civilización helenística*. Historia del Mundo Antiguo, vol. 35. Akal. Madrid, 1993.
- Plácido, D.:** *Cultura y religión en la Grecia arcaica*. Historia del Mundo Antiguo, vol. 22. Akal. Madrid, 1992.
- Plácido, D., Folch, D., Ucelay-Da Cal, E.:** *La antigüedad clásica*. Historia Universal, vol. 2. Planeta. Barcelona, 1992.
- Presedo, F.:** *Egipto durante el Imperio Nuevo*. Historia del Mundo Antiguo, vol. 6. Akal. Madrid, 1991.
- Rudaux, L., de Vaucouleurs, G.:** *Astronomía: los Astros, el Universo*. Labor. Barcelona, 1966.
- Smith, R.W.:** *The expanding Universe. Astronomy great debate, 1900-1931*. Cambridge Univ. Press. 1982.
- Stroobant, P.:** *Les progrès de la photographie astronomique*. Observatoire Royal de Belgique. Annuaire Astronomique pour 1908. Bruxelles.

Taton, R. (Dir. Ed.): *Historia General de las Ciencias*. 5 vols. Destino. Barcelona, 1975.

Torroja, J.M.: *Los observatorios astronómicos en la era espacial*. Instituto de Astronomía y Geodesia (CSIC-UCM), 56. Madrid, 1965.

Torroja, J.M.: *El Sistema del Mundo desde la antigüedad hasta Alfonso X el Sabio*. Instituto de España. Madrid, 1980.

Torroja, J.M.: *Historia de la ciencia árabe. Los sistemas astronómicos*. Instituto de Astronomía y Geodesia (CSIC-UCM), 122. Madrid, 1981.

Torroja, J.M.: *Historia de la física hasta el siglo XIX. La mecánica celeste*. Inst. de Astronomía y Geodesia (CSIC-UCM), 132. Madrid, 1983.

Torroja, J.M.: *La obra astronómica de Alfonso X el Sabio*. Instituto de Astronomía y Geodesia (CSIC-UCM), 134. Madrid, 1984.

Urruela, J.: *Egipto: Epoca Tinita e Imperio Antiguo*. Historia del Mundo Antiguo, vol. 2. Akal. Madrid, 1988.

Urruela, J.: *Egipto durante el Imperio Medio*. Historia del Mundo Antiguo, vol. 4. Akal. Madrid, 1991.

Wagner, C.G.: *Babilonia*. Historia del Mundo Antiguo, vol. 3. Akal. Madrid, 1988.

EL CALENDARIO ACTUAL EN OCCIDENTE Y SUS ORÍGENES

C. de Toro y Llaca

Instituto de Astronomía y Geodesia (CSIC-UCM)

Facultad de Ciencias Matemáticas

Universidad Complutense de Madrid

1. INTRODUCCIÓN

El concepto cíclico del tiempo, asociado a fenómenos naturales o astronómicos y susceptible de ser medido y dividido en unidades, que permite situar acontecimientos ocurridos en el pasado y proyectar actividades futuras, es compartido por todas las culturas. Por el contrario, la percepción de un tiempo absoluto, que fluye homogénea y uniformemente independiente de la dinámica del Universo, según la idea clásica, no es inherente al ser humano. Estas dos ideas contrapuestas sobre la naturaleza del tiempo, ligado o independiente del movimiento de los cuerpos, ha suscitado numerosas controversias a lo largo de la historia. Sin embargo, la noción subjetiva del tiempo es, tanto a corto como a largo plazo, el resultado de la comparación de dos ordenaciones de sucesos. De hecho, aunque existan argumentos en contra, lo cierto es que desde las épocas más primitivas se han ordenado los acontecimientos de la vida cotidiana estableciendo su anterioridad, simultaneidad o posterioridad en relación con otros sucesos señalados, tales como las primeras nieves del año, las crecidas de los ríos o, más comúnmente, fenómenos astronómicos de carácter periódico.

El movimiento diurno del Sol fue desde tiempos remotos el sistema utilizado para definir la unidad más elemental de tiempo, el día, aunque se necesitaran milenios para que se asociase con la rotación de la Tierra. Esta será la unidad natural adoptada sin excepción en todos los sistemas de cómputo temporal conocidos, lógico puesto que el Sol es, entre todos los astros, el que posee una mayor influencia en la actividad humana. Exceptuando algunos sistemas cronológicos aislados, como el

Cómputo Largo maya o el Período Juliano, en que los días forman una sucesión continuada a partir de una fecha origen, las unidades fundamentales se agrupan en ciclos auxiliares, teniendo en cuenta los períodos de repetición de ciertas configuraciones celestes en relación con el sistema de numeración utilizado. Así, desde su origen, en las civilizaciones del Próximo y Lejano Oriente, del antiguo Mediterráneo y aún en las de América precolombina, los calendarios han sido establecidos sobre la base del desplazamiento aparente del Sol, de la Luna, de los planetas o de las estrellas sobre la esfera celeste. Con un sentido, en general, profundamente religioso, han prevalecido los ciclos mensual y anual. En particular, el período de repetición de las configuraciones lunares, es decir de plenilunios y novilunios, denominado mes sinódico, es al que trata de aproximarse el mes civil, mientras que el fenómeno natural que significa la sucesión de las estaciones, perfectamente conocido y previsible, consecuencia del movimiento orbital de la Tierra alrededor del Sol, define el año del calendario.

Este problema, aparentemente sencillo, se complica matemáticamente debido a dos factores. En primer lugar, es imposible expresar las duraciones del mes sinódico y del año trópico mediante un número exacto de días, entero o fraccionario. Por otro lado, es necesario tener en cuenta la no constancia de los ciclos astronómicos asociados. Así, por ejemplo, el movimiento diurno del Sol, que define la unidad fundamental, sufre variaciones estacionales y de corto período debido a la oblicuidad de la eclíptica, la excentricidad de órbita de la Tierra y las irregularidades de su movimiento de rotación, entre otros factores. Idénticos problemas presentan el año trópico, afectado por el desplazamiento del equinoccio de primavera, y el período de revolución sinódica de la Luna, en el que interviene la inclinación y orientación variables de la órbita lunar respecto a la eclíptica. Por este motivo, la medida del tiempo y el establecimiento de calendarios precisos, que preserven la concordancia entre cómputo civil y períodos de repetición de fenómenos astronómicos, se convierte en uno de los problemas fundamentales de la astronomía de posición.

El predominio creciente del modelo político occidental desde los primeros siglos de nuestra era, ha impuesto el cómputo temporal del calendario cristiano, que es utilizado actualmente de forma casi universal, aunque no sin grandes reticencias por parte de otras culturas. Gesta-

do en su forma primitiva en Egipto durante el Tercer Milenio a. de C., cuenta asimismo con importantes aportaciones procedentes de civilizaciones coetáneas que se desarrollan, principalmente, en Mesopotamia, Asia Menor y Norte de Africa. Posteriormente sería influenciado por el mundo romano, el antiguo pueblo hebreo y el Islam. La Reforma Gregoriana, realizada en 1582, le daría la forma definitiva que constituye el principal sistema cronológico del siglo XX.

2. CALENDARIOS PRIMITIVOS

En la evolución cultural de los antiguos pueblos de Oriente y de la cuenca sur del Mediterráneo se encuentra el origen del sistema cronológico actual. En nuestro cómputo temporal aún perdura el año civil egipcio de 365.25 días, aproximación del año trópico, y su regla de intercalación de un epagómeno cada tres años comunes. La formación de la semana de siete días, de carácter planetario (Saturno, Júpiter, Marte, Sol, Venus, Mercurio y Luna), es de origen babilónico, aunque su designación actual es, claramente, de influencia grecorromana. Finalmente, los sistemas de numeración mesopotámicos de bases 12 y 60 darían lugar a la división del día en 24 horas de sesenta minutos.

Los **primitivos sumerios** observaron cómo las estrellas, que agrupan en constelaciones, se mueven sobre la Tierra en círculos perfectos, manteniendo invariables sus posiciones relativas a lo largo de las sucesivas revoluciones. Por este motivo, podría haber resultado lógico que este pueblo de astrónomos hubiera considerado el día sidéreo como unidad elemental en la elaboración de sus tablas de efemérides. Sin embargo, no existe constancia de este hecho. Adoptarán el día solar verdadero, unidad natural en todas las civilizaciones, puesto que el movimiento diurno de este astro, fácilmente determinable mediante el gnomon, rige los ciclos de actividad y vigilia. A partir del número 12, tomado como base de numeración, dividen el día en 12 horas dobles de igual duración, denominadas *beru*, agrupadas en tres vigilias diurnas y tres nocturnas, que comienzan a la puesta del Sol. Cada hora doble era dividida, a su vez, en 60 dobles minutos y cada minuto en 60 dobles segundos. Estas unidades de tiempo serían adoptadas por los hebreos tras su cautividad en Babilonia y, posteriormente, por griegos y romanos.

Cuando los pueblos de Mesopotamia observan la Luna, se dan cuenta de dos hechos: recorre el zodiaco en 27 días y tiene un período de configuración de 30 días. Esto tiene para ellos una gran relevancia, ya que es el único astro que crece y mengua, desplazándose sobre el zodiaco en sentido contrario al de rotación de las estrellas. No es de extrañar, por lo tanto, que el dios *Marduk*, que marca y gobierna la duración de los períodos de tiempo, asigne como deidad rectora de este astro el Dios Sabio *Nanna*, reservando para su hijo *Utu* el Sol. En consecuencia, en la época arcaica, se considera un calendario lunar formado por 12 meses alternados de 29 y 30 días que se inician en la *Luna Nueva Creciente*; es decir, en el instante en el que puede verse por primera vez la luna nueva tras la puesta del Sol. Aunque existen referencias sumerias anteriores de que el año empezaba en otoño, en la época asirio-babilónica fijan el origen en el mes de *Nisan*, inmediatamente posterior al equinoccio de primavera. Denominan a los siguientes meses *Aiar*, *Siwan*, *Tammuz*, *Ab*, *Elul*, *Teshrit*, *Arahsamna*, *Kisilimmu*, *Tebet*, *Shebat* y *Adar*.

Teniendo en cuenta que la duración de los meses lunares es variable, con un período medio de 29.53 días solares, la configuración adoptada de 354 días constituía una buena aproximación del año lunar. Sin embargo, los astrónomos sumerios, capaces de determinar con gran precisión mediante el polos la duración del año trópico a partir de los instantes en que se producen equinoccios y solsticios, constatan que existe cada vez una mayor separación entre el calendario lunar y la sucesión de las estaciones. Por este motivo, cuando el desfase entre el equinoccio de primavera y el inicio del mes de *Nisan* lo hace aconsejable, se agrega un mes intercalar, denominado *Segundo Mes de la Cosecha*. Asignado a la pequeña constelación del Cuervo, dio origen a considerar la cifra 13 como nefasta y a esta ave como portadora de desgracias. En el siglo VI a.C. establecen una regla fija de interpolación, que sería sucesivamente modificada hasta que en el año 383 a.C. se adopta el convenio definitivo de intercalar 7 meses lunares de 29 días en 19 años, encontrándose, finalmente, la concordancia precisa entre el calendario y el año solar.

En la cosmología sumeria los planetas poseen un carácter específico, al que atribuyen cambiantes estados de ánimo en virtud de su luminosidad variable con las condiciones meteorológicas. Para ellos este hecho tiene una gran importancia en relación con la astrología, dado que

toda estructura y suceso de la base del *An-ki*, la Tierra, es reflejo de los astros de la bóveda celeste. Quizás por este motivo, sobre la base de los cinco planetas conocidos que, al igual que el Sol y la Luna, se distinguen por su movimiento "errante" respecto al resto de las estrellas, formarán la semana de siete días, ciclo de tiempo que, transmitido por los pueblos del Mediterráneo, perdurará hasta nuestros días.

Los **egipcios**, cuya supervivencia estaba ligada a las periódicas crecidas del río Nilo, estudiaron la sucesión de las estaciones y tenían ya el concepto de "año" con anterioridad al 4000 a.C. En la época predinástica del antiguo Egipto (4500-3100 a.C.) se utilizó un calendario agrícola lunisolar, formado por tres estaciones de cuatro meses, ligadas a las crecidas del río Nilo: *Arhet*, la inundación; *Peret*, siembra y crecimiento; *Semu*, recogida y agua baja. Cada mes lunar era dividido, a su vez, en tres semanas de diez días, período de tiempo relacionado con los 36 *decanos* de la banda zodiacal egipcia. A fin de sincronizar este calendario con el ciclo natural de las estaciones, marcado por las salidas helíacas de *Sothis*, la estrella Sirio, se añadía un mes intercalar cuando se observaba el orto de Sirio en los últimos días del cuarto mes de la estación tercera.

Posteriormente, a principios del III Milenio a. de C., coincidiendo con la unificación del Alto y Bajo Egipto, adoptan con carácter administrativo el calendario de 365 días, añadiendo, simplemente, cinco días adicionales a los 12 meses de 30 días. Serán denominados "encima del año" por los egipcios y, posteriormente, *epagómenos* por los griegos. La facilidad de cálculo que presenta este calendario hizo que su uso astronómico persistiera en occidente, aunque no de forma generalizada, hasta el siglo XVI, siendo utilizado por Copérnico en la elaboración de sus tablas lunares y planetarias.

Durante la Segunda Dinastía se fijaba el comienzo del año en torno al 19 de julio, fecha de la aparición heliaca de Sirio, al producirse en esta época el desbordamiento anual del Nilo en el sur del país. Sin embargo, observan cómo con el paso del tiempo se produce cada vez una mayor separación entre estos fenómenos. Determinarán, tras milenios de cálculos astronómicos, que la simultaneidad de inicio del año, inundación y orto heliaco posee un período de repetición de 1460 años, "... número de años igual a cuatro veces el número de días del calendario", denominado *Período Sothíaco*. De hecho, se registraron coincidencias en

los años 4249-4242, 2785-2782 y 1325-1322 a.C. La observación de este desfasaje les induce a añadir un día cada cuatro años, considerando 6 epagómenos en lugar de 5. Esta unidad de tiempo, de 365.25 días, fijada en el año 238 a.C. por decreto de Tolomeo Euergetes, ha perdurado hasta nuestros días debido a que Julio Cesar se dejó aconsejar por un astrónomo egipcio, Sosígenes, cuando efectuó la reforma del calendario en el año 46 antes de nuestra era.



Fig.1. Calendario de Elephantina.

En cuanto a la división del día, los egipcios lo hacen, al igual que los sumerios, en 24 horas. Sin embargo, dividen el tiempo entre el orto y el ocaso del Sol en 12 horas y el período de oscuridad restante en otras 12, obteniendo una duración muy variable a lo largo del año para esta unidad fundamental. Para la medida del tiempo, los egipcios disponen en

el 3000 a.C. del gnomon y la clepsidra, al igual que otras culturas, pero, además, disponen de diagramas estelares que les permiten determinar la hora durante la noche a partir de la observación de estrellas.

La **civilización china** poseía un calendario lunisolar de 365.25 días más de veinticuatro siglos antes de nuestra era, establecido por el sencillo procedimiento de medir la duración del año solar mediante el gnomon, determinar el mediodía, así mismo por intermedio de relojes de Sol, y dividir el día en 12 partes de igual duración mediante clepsidras. Eran conocidos los periodos de repetición de las configuraciones lunisolares de 19 y 76 años, denominados *tchang* y *pu* respectivamente, así como la equivalencia entre 81 meses lunares y 2392 días solares. El principal problema de los calendarios de la antigua China, en lo que respecta a las dataciones históricas, es el complejo sistema de ciclos y los continuos cambios en el origen de la escala. Así, desde los primeros Han, se establece el origen y designación de las sucesivas cronologías en función de cada nuevo emperador.

Según los textos védicos y brahmánicos, que datan del período de la historia que se extiende entre la invasión de los arios vedas, en torno al 1750 a.C., el advenimiento de Buda (563-483 a.C.) y la conquista del valle del Indo por Ciro II de Persia en el año 339 a.C., el **calendario hindú** fue claramente lunisolar. Basado en las posiciones relativas del Sol y de la Luna, deducidas a partir de la observación de las fases lunares, tenía una duración de 360 días, agrupados en 12 meses idénticos: *Caitra*, *Vaiçâkha*, *Jyaistha*, *Ashâdha*, *Çrâvana*, *Bhâdrapada*, *Açvina*, *Kârttika*, *Mârgaçîrsha*, *Pausha*, *Mâgha* y *Phâlguna*. Inicialmente, consideraron un mes intercalar de 30 días, que era agregado únicamente cuando se hacía necesario equilibrar la diferencia excesiva entre el año civil y el año trópico. Al aumentar con el paso del tiempo sus conocimientos astronómicos, reformarán la duración del mes intercalar, estableciendo una regla fija de 26 días cada período de 5 años normales (1800 días), denominado *Yuga*. Obtendrán, de esta forma, una aproximación bastante correcta del hoy denominado año juliano. Este año hindú primitivo estaba constituido por 10800 *momentos*, resultado de dividirlo en 12 meses de 30 días, denominados *nycthémera*, que, a su vez, son divididos en 30 *momentos*, 15 diurnos y 15 nocturnos. A partir del Período Siddhânta consideran la semana planetaria de siete días,

posiblemente bajo la influencia de los pueblos de Mesopotamia con los que tuvieron contacto comercial y cultural a lo largo de toda su historia.

En el análisis del movimiento de la Luna, así como en el estudio de otros fenómenos astronómicos relacionados con él, utilizarían un calendario estrictamente lunar, en el que cada mes de 27 ó 28 días solares era dividido en dos *paksha* de 15 *tithi*, días lunares, unidad de tiempo variable y no coincidente con la definida de forma natural por las sucesivas revoluciones del Sol. Estas quincenas se inician con las lunas nueva y llena, determinándose para ellas las fechas correspondientes del calendario civil. Cada *thiti* será, además, dividido en dos *karana*, intervalos idénticos de tiempo. Finalmente, existe constancia de la construcción de un calendario planetario basado en la división por 12 del período de repetición de los ortos heliacos de Júpiter, que agrupan en ciclos de 60 años jovianos.

3. LOS ANTIGUOS PUEBLOS DE LA CUENCA DEL MEDITERRÁNEO

Desde el tercer milenio antes de nuestra era, la extensa región costera del Levante Mediterráneo que se extiende al norte de Mesopotamia entre Siria y el Sinaí, estaba habitada por un conjunto de pueblos de cultura y religión comunes, denominados de forma genérica cananeos. Poseedores de una floreciente civilización, heredan de Mesopotamia la escritura cuneiforme, que transformarían en alfabética en el año 1380 a.C., y el calendario arcaico de Nipur, cuyo año de 354 días se iniciaba en la luna nueva creciente del equinoccio de otoño. La primitiva Canaán vería reducidos sus territorios por la invasión de israelitas (1230 a.C.), arameos (1200 a.C.) y filisteos (1190-1180 a.C.), denominándose a partir de este momento Fenicia en la terminología griega.

El **antiguo pueblo hebreo** adopta la vida sedentaria en época tardía respecto de las florecientes culturas del Próximo Oriente. Quizás por este motivo no destacan desde el punto de vista científico. De los cananeos toman algunos de los elementos más fundamentales de su ciencia. Su cultura se caracteriza, además, por la asimilación de los conocimientos de asirios, caldeos, persas, egipcios y romanos, bajo cuya dominación estuvieron a lo largo de su corta vida como estado, que se

extiende entre el año 975 a.C., época estimada de la creación del Estado de Israel tras la derrota de los filisteos en Gat, y el año 70 d.C., fecha en la que se produce la caída de Jerusalén ante las legiones del emperador Tito. Inicialmente utilizan el calendario cananeo de 354 días. El calendario mesopotámico sería adoptado de forma estricta a partir de su cautividad en Babilonia en el siglo VI a.C., para lo cual trasladan el origen del año del equinoccio de otoño a la *neomenia*, luna nueva de primavera. Se trata de un calendario lunisolar, en el que es necesario coordinar los ciclos lunares, que determinan meses de 29 y 30 días, con la sucesión de las estaciones. La concordancia era obtenida a base de repetir cada dos o tres años el mes de *Abîl*, que precede a la primera luna de primavera. En cuanto al origen de la escala, han existido numerosas modificaciones; desde la relación con acontecimientos señalados, como la salida de Egipto, períodos de gobierno de ciertos monarcas, el 1 de Nisan del 311 a.C., que marca el inicio de la era de los seléucidas, o la fecha estimada para la Creación. Este calendario, con sucesivas reformas, sigue en vigor en nuestros días.

Antes de describir el resultado de las modificaciones que conducen al actual sistema cronológico israelita, puede ser de interés recordar la existencia de un calendario de uso no generalizado, posiblemente de influencia helenística, cuya referencia nos llega a través de textos del siglo II a.C. y de los Manuscritos del Mar Muerto, donde se revela la utilización de este calendario en el siglo I a.C. por parte de la secta de los esenios. En él, un año de 364 días es dividido en cuatro estaciones de tres meses, de 30, 30 y 31 días respectivamente. De esta forma se obtenía la concordancia perfecta entre el año y un número exacto de meses y semanas. No así con la sucesión de equinoccios y solsticios.

El **calendario hebreo actual** es el resultado de la reforma del primitivo sistema cronológico israelita, realizada por el rabí Samuel en el año 338 d.C. Claramente lunisolar, trata de ajustar la duración media de los meses a las lunaciones y el año civil medio al trópico. A fin de armonizar estos dos períodos de tiempo, toman como base los 354 días del calendario cananeo y aplican, sobre el ciclo de 19 años, una compleja ley de intercalaciones positivas y negativas. Como resultado, se tienen *años comunes* de 12 meses y *años embolísticos* de 13, correspondientes estos últimos a los años 3, 6, 8, 11, 14, 17 y 19 del ciclo de Metón. En ellos, se intercala el mes *ve-Adar* entre los meses comunes de *Adar* y *Nisan*. La

duración de los años comunes es variable, ya que se restan y añaden los días necesarios para obtener un número exacto de lunaciones. Se obtienen, de esta forma, *años comunes regulares* de 354 días, *años comunes defectivos* de 353 días, en los que el mes de Kislev tiene únicamente 29 días, y *años comunes abundantes* de 355, en los que se añade un día al mes de Hesvan. Los años embolísticos pueden ser, a su vez, regulares (384 días), defectivos (383 días) o abundantes (385). Conservan para los meses la denominación asirio-babilónica (Tishri, Cheshwan, Kislew, Tevet, Shevat, Adar, Nisan, Iyyar, Siwan, Tammuz, Av y Elul) desde la época de su cautiverio, pero designarán los días de la semana por su número de orden, exceptuando el *sabbath*. El día comienza con la puesta del Sol, el año se inicia el día 1 de Tishri, fecha variable en relación con el calendario gregoriano entre finales de septiembre y primeros de octubre, y el decimoquinto día del mes de Nisan se celebra la pascua, que inaugura el ciclo de fiestas religiosas. El origen de la escala, año 1 del calendario israelita, coincide con el 7 de octubre del -3760 del calendario proléptico, época mítica de la creación del mundo.

Desde el año 3000 a.C., en los valles e islas del sur de los Balcanes se extiende una raza mediterránea cuya cultura tenía una estrecha relación con las de Egipto y Asiria, mucho más antiguas y avanzadas científicamente. Esta raza egea tuvo su máximo esplendor en la isla de Creta en torno al 2000 a.C. Aproximadamente en el año 1500 a.C., comienzan a producirse invasiones sucesivas de pueblos arios desde el norte: aqueos y helenos, nombre genérico éste último de un conjunto muy diverso de tribus, entre las que destacan eolios, jónicos y dorios. Dominando y asimilando a los demás pueblos, subsisten dorios y jónicos; es decir, Esparta y Atenas, cuya rivalidad constituye la base de la civilización griega. La paz entre estas dos ciudades se alcanza en el siglo VI a.C. con las constituciones de Solón y Licurgo. En esta época se produce un movimiento de expansión por todo el Mediterráneo.

Bajo el influjo de otras culturas y de las teorías cosmológicas de las diferentes escuelas, el **calendario griego** sufrió numerosas reformas a lo largo de la historia. Se sabe que en tiempos de Solón, 594 a.C., poseen un calendario con años "normales" de 354 días, con meses alternados de 29 y 30 días, al que aplican una regla de intercalación de 3 meses lunares en 8 años. Sin embargo, en la época de Filolao, en torno al

400 a.C., consideran un período lunisolar de 59 años con 21 meses lunares intercalares, que forman el denominado *Gran Año* de 729 meses, igual al número de días y noches del año solar. Posteriormente, reconociendo los extensos conocimientos astronómicos de los pueblos de Mesopotamia, adoptarán la regla de intercalación de 19 años, considerando 12 años de 12 meses y 7 años de 13. Este período de 235 meses lunares sería denominado *Ciclo de Metón* en honor del astrónomo griego del mismo nombre. Los 6940 días que constituyen el Ciclo de Metón difieren únicamente en 0.4 días de la duración hoy aceptada para el ciclo de 19 años trópicos. Sin embargo, en la antigua Grecia, bajo la hipótesis de un año trópico de 365.25 días, se considera necesaria una reforma. Por este motivo, Calippo propone en el siglo IV a.C. la eliminación de un día cada 76 años, suponiendo erróneamente que esta regla evitaría la acumulación de 0.25 días en un ciclo de Metón.

El calendario babilónico y sus sucesivas reformas fue aceptado por los continuadores de la tradición pitagórica. Sin embargo, en la escuela de Alejandría, bajo la influencia de la ciencia egipcia, conocerán y difundirán el calendario de 360 días normales y 5 *epagómenos*, así como su regla fija de intercalación de un epagómeno cada 4 años. Después de diversas cronologías de carácter político, en ambas escuelas adoptarán el convenio de fijar el origen de la escala en el 775 a.C. y contar el tiempo por olimpiadas, que se celebraban cada cuatro años.

A partir del año 753 a.C., los romanos, cuyo desarrollo científico inicial fue influenciado por la concepción del mundo, profundamente religiosa, del pueblo etrusco, se extienden por toda la cuenca del Mediterráneo, dominando Macedonia (168 a.C.), Grecia (146 a.C.) y Egipto (100 a.C.). Aunque es de suponer que conocían el calendario brontoscópico etrusco, la primera constancia fiable de una cronología propiamente romana la constituye el **Calendario de Numa** (450 a.C.), formado por 12 meses alternados de 29 y 30 días, al que se añadía un mes denominado *mercedonio* cada dos años, cuya longitud era alternativamente de 22 ò 23 días, a fin de obtener el valor medio de 365.25 días del ciclo solar. Sin existir información del razonamiento que les conduce a ello, se sabe que fue modificado en tiempos de los decenviros (siglo V a.C.) añadiendo un día a los 354 que constituían el año normal de Numa, reforma claramente errónea. La distribución de los meses adoptaría la forma: *Martius* (31), *Aprilis* (29), *Maius* (31), *Junius* (29), *Quintilis* (31), *Sexti-*

lis (29), *September* (29), *October* (31), *November* (29), *December* (29), *Januarius* (29) y *Februarius* (28). Es de destacar que, exceptuando *Martius*, dedicado al dios Marte, *Aprilis*, mes de la germinación, *Maius*, *Junius* y *Januarius*, en honor de Maya, Juno y Jano bifronte respectivamente, y *Februarius*, denominado así por la Febrero, Fiesta de la Purificación que se celebraba a mediados de este mes, eran designados por el numeral. Este antiguo año romano se iniciaba el quincuagésimo día de *Martius*. El mes mercedonio, situado inmediatamente después del 23 de *februarius*, fecha denominada *Terminalia*, estaba constituido por la unión de los días intercalares y los cinco restantes de *Februarius*.

Tres días particulares del mes tienen designación propia: *calendas*, primer día del mes, *idus*, que coinciden con el trigésimo en los meses cortos y con el quincuagésimo los largos, y *nonae*, nueve días antes de los idus. En función de ellos se expresa la fecha de un acontecimiento, dada por el número de días que faltan para el referencial más próximo. Es de señalar que el nombre "calendario" deriva del verbo *calo*, llamar a reunión, ya que en las *calendae* se pagaban las deudas y se denominaba *calendarius* al registro de los vencimientos. En este primitivo **Calendario de la República Romana**, los días del mes se agrupan en *nundinae*, semanas de nueve días, período de tiempo que separa el inicio de las *Feriae Sementivae* o mercados populares. Existen, además, días específicos convenientemente señalizados a lo largo del año, como los *dies fasti* (F), en los que estaba permitida la *legis actio*, *dies nefasti* (N), *dies comitiales* (C), en que la *Comitia* o Asamblea de Ciudadanos celebraba sus reuniones, *dies fastus purus* (FP), *dies nefastus purus* (NFP), *dies endotercisus nefastus* (EN), destinados a las ofrendas, *dies quando res comitiavit fas* (QRCF) y *dies quando stercus delatum fas* (QSDF), fecha en la que *Starcus* era trasladado al templo de *Vesta*. En el calendario de la República, el día se dividía en trece intervalos: *diculum*, *mane*, *ad meridiem*, *meridies*, *de meridie*, *suprema*, *vespera*, *crepusculum*, *prima fax*, *concibium*, *intempesta nox*, *media nox* y *gallicinium*. Posteriormente adoptarían el sistema babilónico de 24 horas.

En el siglo II a.C. se desplaza el origen del año de los *Idus* de *Martius* a las *Calendas* de *Januarius*, pero la designación numeral de los meses no fue modificada. Esta disposición sería conservada en las reformas juliana y gregoriana.

Los romanos establecieron la secuencia cronológica a partir de la fundación mítica de su ciudad (*ab Urbe condita*), el 23 de abril del año 753 a.C. según el cómputo de la era cristiana, midiendo sobre esta escala de forma secuencial en base a la sucesión de magistrados.

A pesar de la intercalación de meses mercedonios, el complejo sistema cronológico impuesto por el calendario lunisolar de la República Romana, con un año civil medio de 366.25 días, había alcanzado en el siglo I a.C. un desfase con el ciclo solar próximo a los tres meses. Principalmente por este motivo, Cayo Julio César (100-44 a.C.), protector de la cultura, decreta en el año 708 de la fundación de Roma la reforma del calendario. Aconsejado por Sosígenes, astrónomo de la escuela de Alejandría, incorpora una adaptación al mundo romano del año civil medio de 365.25 días y de su regla de intercalación de un epagómeno cada cuatro años, vigente en Egipto desde el año 238 a.C., en virtud de la reforma de Tolomeo Euegertes. La primera modificación consistió en añadir 90 días al año 708 *ab Urbe condita* (46 a.C.), como resultado de los 23 días del mes mercedonio correspondiente al calendario de Numa y de la intercalación de 67 días entre November y December. Por este motivo, el primer año del **Calendario Juliano**, denominado vulgarmente "el año de la confusión", tuvo 445 días. A partir del 46 a.C. se adoptaría un año civil de 365 días, distribuidos en 12 meses: *Januarius* (31), *Februarius* (29), *Martius* (31), *Aprilis* (30), *Maius* (31), *Junius* (30), *Quintilis* (31), *Sextilis* (30), *September* (31), *October* (30), *November* (31) y *December* (30). La intercalación del día suplementario cada cuatro años debía realizarse, al igual que en el calendario prejuliano, a continuación del dies terminalia. Puesto que, en la forma romana de expresar las fechas, este día era denominado *dies sextus ante calendas martias*, llamaron *bi-sextus* al día intercalar y *bisiesto* al año que lo contenía. El año civil medio de 365.25 días sería denominado desde entonces "año juliano".

Durante el consulado de Marco Antonio (80-30 a.C.), que tuvo lugar en el año 44 a.C., el mes quintilis fue dedicado a la memoria de César, recibiendo el nombre de *Julius*. En el año 24 a.C., un decreto del Senado Romano cambia la denominación del mes sextilis, que a partir de este momento se llamará *Augustus* en honor del César Octavio Augusto (63 a.C.-14 d.C.), cuyo mandato se había iniciado en el 27 a.C. Puesto que el mes sextilis tenía 30 días y el dedicado a Julio César 31, se añade

un día a augustus, que es restado a februarius. A consecuencia de esta reforma, februarius tendría 28 días los años comunes y 29 los bisiestos. Finalmente, a fin de evitar tres meses consecutivos de 31 días, en el mismo edicto se modifica la longitud de los cuatro últimos meses del año. La distribución resultante de la reforma de Augusto [*Januarius* (31), *Februarius* (28,29), *Martius* (31), *Aprilis* (30), *Maius* (31), *Junius* (30), *Julius* (31), *Augustus* (31), *September* (30), *October* (31), *November* (30) y *December* (31)], fue conservada en el calendario gregoriano, por lo que ha perdurado hasta nuestros días.

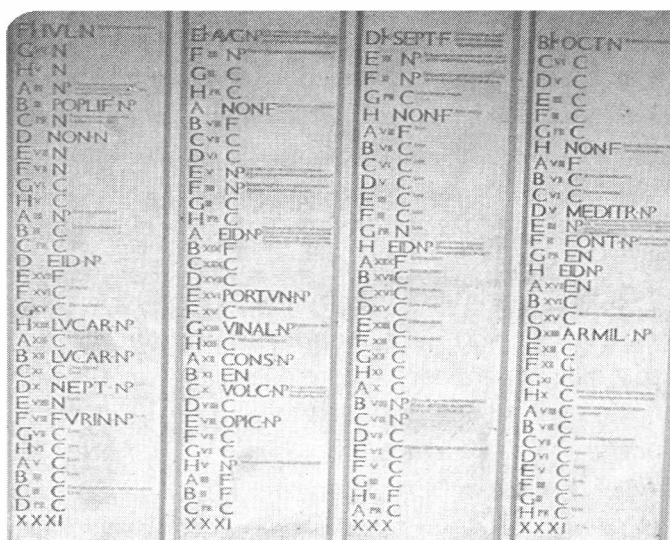


Fig. 2. Calendario juliano del siglo I a.C.
Roma, Museo de la Civilización Romana.

La errónea interpretación del decreto de Julio César hizo que, durante los 37 primeros años de la vigencia del calendario juliano, se realizara la intercalación de bisiestos cada tres años. Al ser detectado un desfase de tres días en el año 10 a.C., el emperador publica un edicto mediante el cual debían ser considerados comunes todos los años comprendidos entre el 745 y el 756 ab Urbe condita. La secuencia continua de años bisiestos se reanuda en el año 8 d.C., considerándose como tales todos los divisibles por cuatro. En esta misma época comienza a introdu-

cirse la semana planetaria de siete días: *dies Lunae*, *dies Martis*, *dies Mercudi*, *dies Jovis*, *dies Veneris*, *dies Saturnis* y *dies Solis*.

La utilización del calendario juliano se extiende rápidamente a todos los pueblos sometidos a la "Paz Romana". Es de señalar que su origen, coincidente con el del calendario de la República Romana, se mantiene en Occidente hasta el año 532, fecha en la que Dionisio el Exiguo establece la Era Cristiana.

Desde el siglo primero de nuestra era, se va produciendo paulatinamente el reconocimiento y asimilación del cristianismo dentro del mundo romano. En el siglo IV, el culto cristiano se ha generalizado de tal forma, que el emperador Constantino I el Grande (270-337) se proclama protector de la Iglesia en el Edicto de Milán del 313 y participa en el Concilio de Nicea, celebrado en el año 325. Uno de los temas fundamentales tratado en este Concilio será el establecimiento de la fecha de la Pascua en relación con el calendario juliano, que en las primeras comunidades cristianas se hacía coincidir con la Pascua hebrea. En base a la tradición evangélica, se fijará esta fecha conmemorativa de la Resurrección de Cristo el *dies Solis* siguiente al plenilunio coincidente o inmediatamente posterior al equinoccio de primavera. En el año 327, el emperador Constantino decreta la adopción oficial de la semana planetaria romana, que había coexistido con los *nundinae* durante siglos, pero transforma el *dies Solis* en *dies Dominica*, a fin de cristianizar las antiguas prácticas del culto al Sol.

4. CALENDARIOS MEDIEVALES

En el año 395, Teodosio I divide el Imperio Romano entre sus hijos Arcadio y Honorio. El Imperio de Occidente desaparece en el año 476, poniendo fin a la Edad Antigua, mientras que el Imperio de Oriente subsiste hasta el año 1453.

En Occidente, la invasión progresiva de tribus "bárbaras" se intensifica a partir del año 401, culminando en el año 476 con la destitución del último emperador romano occidental. La mezcla de los valores fineses, eslavos y germánicos con las tradiciones culturales y religiosas

de la sociedad romana, da lugar a la denominada cultura latino-bárbara, caracterizada por un marcado interés por el espíritu y un empobrecimiento científico generalizado, que no se recuperará plenamente hasta el siglo XII con la recepción de la ciencia islámica. Quizás por este motivo, las aportaciones a los sistemas cronológicos fueron escasas en Occidente durante la Alta Edad Media, si exceptuamos los estudios de San Agustín (354-430), cuya preocupación por la naturaleza del tiempo es precursora del pensamiento medieval, el establecimiento de la Era Cristiana y los diversos tratados del Venerable Beda (673-735) sobre el calendario, que serían utilizados posteriormente en la reforma gregoriana. Estos estudios son la respuesta a la necesidad de establecer el Cómputo Eclesiástico en relación con el calendario juliano y, en particular, de determinar correctamente la fecha de la Pascua mediante una regla numérica, independiente de la observación astronómica, tema tratado en sucesivos concilios desde el siglo segundo.

La **Era Cristiana** fue decretada por el matemático romano Dionisio el Exiguo en el año 525 d.C. Se inicia en la fecha del nacimiento de Cristo que, referida a la era de Diocleciano, estiman que se produjo el día 25 de diciembre del año 753 ab Urbe condita, en coincidencia con el solsticio de invierno (*Dies Natalis Solis Invictis*). Propone, además, que el año comience el 25 de marzo, fecha de la concepción. Este origen de la nueva escala no fue aceptado unánimemente en Europa, de forma que durante siglos coexisten cronologías diferentes en las que el año se inicia el 1 de enero, el 1 marzo, el 25 de marzo y el 1 de septiembre. A partir del siglo XVI se generaliza la adopción del 1 de enero como origen de la escala, aunque países como Florencia y Rusia permanecerían al margen hasta mediados del siglo XVIII. Esta confusión de orígenes dificulta, aún en la actualidad, la datación histórica de ciertos documentos.

El cómputo de la era cristiana se establece como una escala sin cero, dado que esta cifra, utilizada por árabes e hindús de forma generalizada, permanece desconocida en el occidente cristiano hasta que es difundida por los científicos españoles en el siglo XII. En consecuencia, el origen de esta escala es, por definición, el año 1 después de Cristo, lo que provoca numerosas dificultades cronológicas. Así, por ejemplo, cuando se mide el tiempo en el cómputo de la era cristiana, nos encontramos con que el siglo XX comenzó el 1 de enero de 1901 y terminará

el 31 de diciembre del año 2000, dando paso al tercer milenio, puesto que el 1 de enero de ese año habrán transcurrido únicamente 1999 años desde el origen. A fin de evitar este tipo de problemas, se construyó, muy posteriormente, el denominado *Cómputo Astronómico* o **Calendario Juliano Proléptico**, identificando el año 1 a.C. con el "año cero" y asignando cifras negativas a los sucesos acaecidos con anterioridad a esta fecha. De esta forma, si contamos los siglos a partir del año cero, entraremos astronómicamente en el siglo XXI el 1 de enero del año 2000.

El Imperio Romano de Oriente preserva su integridad territorial hasta el año 1453. Por este motivo, fueron durante siglos depositarios de la cultura grecorromana. Por otra parte, el distanciamiento de las Iglesias Romana y Bizantina conduciría a la actual divergencia cronológica, en la cual el mundo ortodoxo continúa utilizando el calendario juliano, al menos en el cómputo religioso, ya que en la vida civil sería incorporado el calendario gregoriano a mediados del siglo XX ante el imperativo de las relaciones internacionales.

En el primer tercio del siglo VII los árabes inician un proceso de expansión que culminaría con el dominio del Indostán, Siria, Persia, Egipto, el norte de Africa y la península Ibérica. Sin romper las estructuras básicas de su sociedad, desarrollan su floreciente cultura incorporando la tradición científica de los pueblos sometidos. Por este motivo, han desempeñado un papel histórico como depositarios de los conocimientos astronómicos persas, griegos y bizantinos, que transmitirían al occidente cristiano en los siglos XI y XII.

En el desarrollo de los **sistemas cronológicos árabes** no puede cuestionarse la influencia de las teorías clásicas. Sin embargo, es necesario tener en cuenta, también, que este pueblo estaba caracterizado por una intensa actividad científica en el campo de las matemáticas y de la astronomía, por lo que incorporan importantes teorías propias en el estudio de los movimientos aparentes del Sol y de la Luna, necesarios en el establecimiento de calendarios. Así, aunque conocen y respetan la obra de Hiparco, no existió unanimidad sobre el carácter secular de la precesión de los equinoccios. Cultivadores de una ciencia propia, desarrollan la teoría contrapuesta de la *Trepidación*, también denominada del *Movimiento de la Octava Esfera*, expuesta por Tàbit ibn Qurra (834-

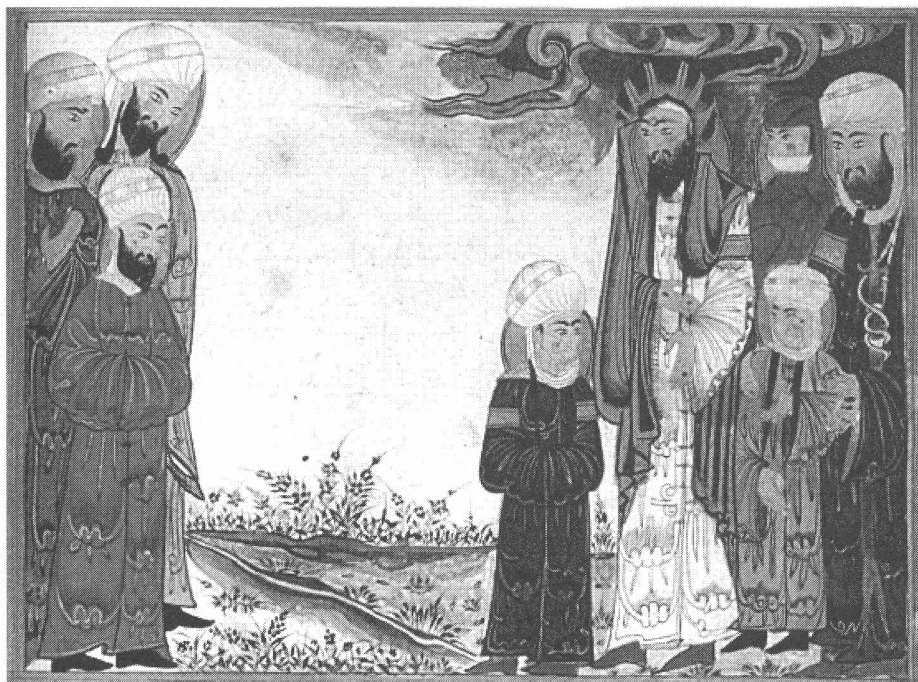


Fig. 3. Miniatura del *Tratado de Cronologías Medievales* de al-Biruni. París, Biblioteca Nacional.

901) en sus *Canon revolutiones anni* y *De moter accesonis et recessionis*. Al-Battani (858-929), meticuloso observador, obtendría un valor de $365^d 5^h 46^m 24^s$ para la longitud del año trópico, sumamente preciso teniendo en cuenta los instrumentos empleados para ello. Otra aportación relevante es la de Umar Khayyàm, que efectuó una reforma del calendario tan precisa como la gregoriana del año 1582, aunque no fue aceptada en el occidente cristiano.

En contacto con diversas civilizaciones, tanto de la cuenca del Mediterráneo como del Extremo Oriente, y poseedores de un espíritu crítico, realizarán numerosos estudios comparativos de los sistemas cronológicos conocidos, entre los que destacan las obras de al-Biruni (973-1048), que escribió un *Tratado de Cronologías Medievales*, al-Tùsi, que en el primer libro de las *Tablas de Ilkhan* (1272), realiza un análisis de los calendarios chino, griego, árabe y persa, y las Tablas de Ulùgh Beg, elaboradas en 1447 en el observatorio de Samarcanda, en las

que, entre otros trabajos astronómicos de gran valía, se realiza un estudio comparativo de los diversos conocimientos existentes sobre el tiempo y su medida

Adoptarán en la vida social, agrícola y ganadera un calendario acorde con la sucesión de las estaciones en el que el mes se inicia en la luna nueva creciente, aunque el calendario litúrgico sea estrictamente lunar, pero con meses de duración fija. Este **calendario litúrgico musulmán**, conocida comúnmente como de la Hégira, está formado por 12 meses alternados de 29 y 30 días, denominados; *Muharram, Safar, Rabi'-ul-Aual, Rabi'-ul-Thani, Giumada-Al-Ula, Giumada-Al-Thania, Ragiab, Scia'ban, Ramadhan, Sciaual, Du-Al- Qi'da y Du-Al-Heggia*. Sobre esta base se establece un ciclo de 30 años, formado por 19 años comunes de 354 días, en los que el último mes tiene 29 días, y 11 abundante de 355, correspondientes a los años 2°, 5°, 7°, 10°, 13°, 16°, 18°, 21°, 24°, 26° y 29° del ciclo, en los que el último mes tiene 30 días. De esta forma, con un año civil medio de 354.36667 días solares medios, se obtiene una concordancia bastante exacta con el año lunar. El primer día del año 1 de la Hégira, tomado como punto de partida, coincide con el 16 de julio del 622 según el cómputo juliano de la era cristiana, fecha en la que se produce la huida de Mahoma de La Meca a Medina. La diferencia variable de entre 10 y 11 días existente entre el año lunar y el período de revolución aparente del Sol, hace que el inicio del año se produzca en fechas variables en relación con las estaciones y con los calendarios occidentales contemporáneos.

Poseen, además, un calendario sumamente original, basado en el orto helíaco de las Pléyades, donde el año es dividido en 28 secciones. Para cada una de ellas, se hace una predicción meteorológica y se fijan los períodos agrícolas y ganaderos de acuerdo con las condiciones climáticas previstas.

5. EL CALENDARIO ACTUAL EN OCCIDENTE

A lo largo de los siglos se había producido un desfase progresivo entre el calendario juliano y la sucesión de equinoccios y solsticios, problema fundamental desde el punto de vista eclesiástico al traducirse en un adelantamiento de la fecha de la Pascua. Por este moti-

vo, desde mediados del siglo XIII se suscita en occidente la necesidad de una reforma que, defendida por Grosetesta (1168-1253) y Bacon (1219-1292), entre otros científicos, es presentada al papa Clemente IV. Sin embargo, es desestimada ante la discusión dominante desde la Alta Edad Media sobre la constancia o variabilidad de la diferencia entre los años sidéreo y trópico. Dominarían dos teorías contrapuestas: la precesión de los equinoccios, descubierta en Grecia por Hiparco en el siglo II a.C., pero conocida en China y la India desde tiempos remotos, y la trepidación, supuesta variación periódica de acceso y retroceso de la precesión, enunciada por Qurra en el siglo IX y admitida por numerosos astrónomo-



Fig. 4. Miniatura original de los hermanos Limbourg representando el mes de mayo perteneciente al manuscrito del siglo XV Les Très Riches Heures du duc de Berry. Museo Condé de Chantilly, París.

mos, tanto árabes como occidentales. Por este motivo, Clemente VI encargaría a Juan de Murs la contrastación de las Tablas Alfonsinas. A este efecto, realizaría observaciones entre 1318 y 1344 de las épocas en que se producían equinoccios y solsticios. Sobre estas determinaciones escribirá, en colaboración con Fermín de Belleval, *la Epístola Super Reformatione Antiqui Calendarii*, que será la base de la reforma introducida en el calendario, aunque tendría que ser aplazada más de dos siglos ante la imposibilidad de poner fin a la controversia. A lo largo de este período de tiempo, el problema fue tomado repetidamente en consideración por matemáticos y astrónomos de la talla de Pedro d'Ailly, Nicolás

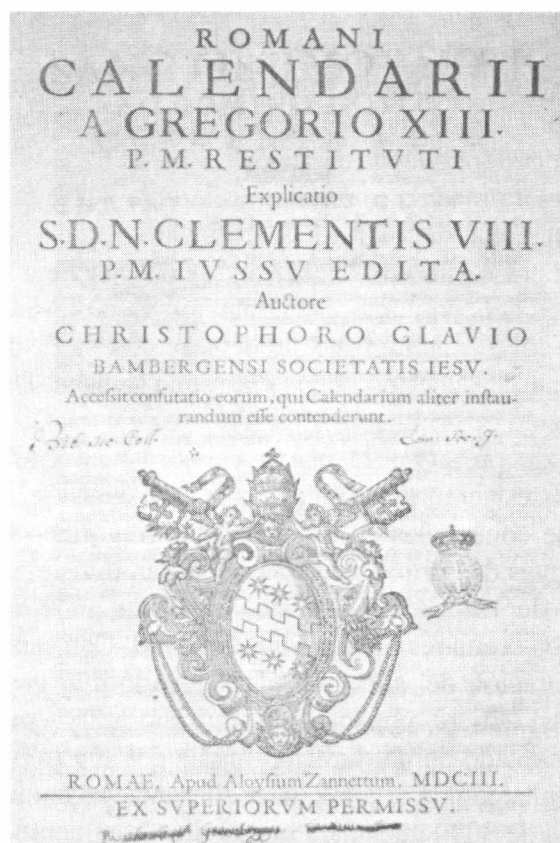


Fig. 5. Portada de la obra de Christopher Clavius Romani Calendarii a Gregorio XIII Restituti Explicatio, publicada en Roma en el año 1603.

de Cusa y Regiomontano, aunque por diversos motivos sus estudios fueron desestimados.

Sería en la segunda mitad del siglo XVI cuando el Papa Gregorio XIII, como consecuencia de las deliberaciones realizadas durante el Concilio de Trento (1545-1563), consulta a los centros de investigación de más prestigio, entre los que figuraban las universidades de Bolonia y Salamanca. Forma una comisión de expertos, integrada por Lilio de Ciro, conocido como Calabria, Pedro Chacón, Ignacio Danti y Christopher Clavius, entre otros, que estudia los aspectos teóricos y prácticos de las modificaciones que deben introducirse en el calendario juliano. El Papa decreta la adopción del nuevo sistema cronológico el 24 de febrero de 1582 en la bula *Inter Gravissimas*. Las bases de la denominada **Reforma Gregoriana** fueron expuestas de forma detallada años más tarde por Christopher Clavius en su obra *Romani Calendarii a Gregorio XIII Restituti Explicatio*, publicada en 1603.

La primera medida impuesta por la bula del Papa Gregorio XIII supuso la eliminación de los 10 días acumulados en los 1257 años transcurridos desde el Concilio de Nicea, como consecuencia de la diferencia entre la longitud del año juliano y la duración variable del año trópico. A este efecto, se hizo coincidir el 5 de octubre con el 15 del mismo mes, pero conservando la sucesión de los días de la semana. De esta forma, el primer equinoccio de primavera se produciría de nuevo el 21 de marzo.

A fin de preservar la nueva concordancia entre calendario y sucesión de las estaciones, se modifica la intercalación de bisiestos, no considerándose como tales en el calendario gregoriano los años múltiplos de 100 cuyas dos primeras cifras no fueran divisibles por cuatro; es decir, a partir de 1582 serán bisiestos todos los años divisibles por 4, exceptuando los seculares no divisibles por 400. Con esta regla de intercalación, la duración del año civil, denominado *año gregoriano*, es de 365.24250 días. Difiere, por lo tanto, en torno a 26 segundos del valor actualmente aceptado como duración media del año trópico (365.24219 días). La acumulación de esta pequeña diferencia es tan lenta, que serían necesarios más de 3000 años para que el desplazamiento de la fecha del equinoccio de primavera fuera de un día. Esta eventualidad ha sido tenida en cuenta en el calendario gregoriano, habiéndose establecido que los años 4000, 8000, 12000, etc., múltiplos de 4000, no sean bisiestos.

Desde el Concilio de Nicea la regla numérica utilizada para determinar la fecha de la Pascua estaba basada en el *número áureo*, denominación griega del número de orden del año dentro del ciclo de Metón. Su conocimiento permitía establecer tablas casi perpetuas de las fechas de los plenilunios. Utilizadas en combinación con la *letra dominical*, asignación alfabética del primer domingo del año, fácilmente determinable en virtud del período de repetición de los días de la semana, proporciona la posición del "domingo siguiente al primer plenilunio de primavera". Este último ciclo, en el que tras 28 años se renueva la coin-

AÑO	Letra dominical	Epacta	Epacta	Pascua	Ascension
1548	B	13 febrero	3 marzo	12 abril	25 mayo
1549	A	5	14 febrero	10	13
1550	C	11 marzo	25 marzo	3	3
1551	E	18 febrero	7	15 abril	21
1552	G	1 febrero	18 febrero	8 abril	14 mayo
1553	A	14	3 marzo	25	27
1554	C	20 marzo	23 febrero	10	10
1555	E	27 febrero	1	17	17
1556	G	5 marzo	8 marzo	24	24
1557	A	12 febrero	15 febrero	1	3
1558	C	19 febrero	22 febrero	8	10
1559	E	26 febrero	1	15	17
1560	G	5 marzo	8 marzo	24	24
1561	A	12 febrero	15 febrero	1	3
1562	C	19 febrero	22 febrero	8	10
1563	E	26 febrero	1	15	17
1564	G	5 marzo	8 marzo	24	24
1565	A	12 febrero	15 febrero	1	3
1566	C	19 febrero	22 febrero	8	10
1567	E	26 febrero	1	15	17
1568	G	5 marzo	8 marzo	24	24
1569	A	12 febrero	15 febrero	1	3
1570	C	19 febrero	22 febrero	8	10
1571	E	26 febrero	1	15	17
1572	G	5 marzo	8 marzo	24	24
1573	A	12 febrero	15 febrero	1	3
1574	C	19 febrero	22 febrero	8	10
1575	E	26 febrero	1	15	17
1576	G	5 marzo	8 marzo	24	24
1577	A	12 febrero	15 febrero	1	3
1578	C	19 febrero	22 febrero	8	10
1579	E	26 febrero	1	15	17
1580	G	5 marzo	8 marzo	24	24
1581	A	12 febrero	15 febrero	1	3
1582	C	19 febrero	22 febrero	8	10
1583	E	26 febrero	1	15	17
1584	G	5 marzo	8 marzo	24	24

AÑO	PENTECOSTE	COLEN	San Juan	San Pedro
1548	1 junio	16 junio	24	17 julio
1549	25 mayo	15	25	3 agosto
1550	13	24 mayo	15	10
1551	1 junio	16 junio	24	17 julio
1552	25 mayo	15	25	3 agosto
1553	13	24 mayo	15	10
1554	1 junio	16 junio	24	17 julio
1555	25 mayo	15	25	3 agosto
1556	13	24 mayo	15	10
1557	1 junio	16 junio	24	17 julio
1558	25 mayo	15	25	3 agosto
1559	13	24 mayo	15	10
1560	1 junio	16 junio	24	17 julio
1561	25 mayo	15	25	3 agosto
1562	13	24 mayo	15	10
1563	1 junio	16 junio	24	17 julio
1564	25 mayo	15	25	3 agosto
1565	13	24 mayo	15	10
1566	1 junio	16 junio	24	17 julio
1567	25 mayo	15	25	3 agosto
1568	13	24 mayo	15	10
1569	1 junio	16 junio	24	17 julio
1570	25 mayo	15	25	3 agosto
1571	13	24 mayo	15	10
1572	1 junio	16 junio	24	17 julio
1573	25 mayo	15	25	3 agosto
1574	13	24 mayo	15	10
1575	1 junio	16 junio	24	17 julio
1576	25 mayo	15	25	3 agosto
1577	13	24 mayo	15	10
1578	1 junio	16 junio	24	17 julio
1579	25 mayo	15	25	3 agosto
1580	13	24 mayo	15	10
1581	1 junio	16 junio	24	17 julio
1582	25 mayo	15	25	3 agosto
1583	13	24 mayo	15	10
1584	1 junio	16 junio	24	17 julio

(1) La letra dominical indica todos los domingos de cada año v. gr. la letra dominical del año 1548 es la A. todos los días que en el Calendario Litúrgico van precedidos de la A. son domingos. Las fiestas devesas dos veces cada año: sobre la primera fiesta el 24 de febrero y la segunda sobre el 24 de septiembre.

(2) Esta fiesta solía celebrarse en el Martirio de la ciudad de León.

Fig. 6. Tabla Permanente de Tiempos, en la que figuran epactas (letra martirologio) y letras dominicales. *Calendario Litúrgico*. Madrid, 1949.

cidencia entre día de la semana y fecha, es conocido con el nombre de *ciclo solar* debido al *dies Solis* designación del domingo en la semana planetaria romana. Sin embargo, al se aplicada la reforma gregoriana, que elimina 3 bisiestos del calendario juliano cada 400 años, el método simple del número áureo dejó de ser válido. Por este motivo, se adopta desde 1582 el método de las *epactas*, desarrollado por Luigi Lilio. Según este astrónomo, conocida la epacta (edad de la Luna el 1 de enero) y la duración del mes sinódico es inmediato calcular las fechas de los pleni-

lunios. Asignando, entonces, la letra dominical en relación con el ciclo solar y teniendo en cuenta que años bisiestos poseen dos letras dominicales (la primera se aplica hasta el 24 de febrero y la segunda desde el 25 en adelante), pueden ser establecidos los tiempos litúrgicos (Adviento, Navidad, Después de Epifanía, Septuagésima, Cuaresma, Pasión, Tiempo Pascual y Tiempo Después de Pentecostés) que integran el Ciclo Temporal móvil cuyo eje es el día de la Pascua. Este método, con algunas correcciones debidas a la variabilidad del mes lunar, sigue utilizándose en la actualidad.

La regla de intercalación de *años abundantes* en el calendario gregoriano equivale a suprimir tres años bisiestos del calendario juliano cada 400 años, lo que incrementa paulatinamente la diferencia entre ambas cronologías, que actualmente es de 13 días. Este hecho debe ser tenido en cuenta en la datación de documentos y en el tratamiento de series de observación históricas, máxime cuando la entrada en vigor del calendario gregoriano ha diferido aún en países próximos de cultura y religión idénticas.

Si bien el calendario gregoriano fue utilizado de forma casi inmediata en todos los países católicos, en los países protestantes, reacios a aceptar las normas decretadas por la Iglesia de Roma, la reforma no sería implantada de forma oficial hasta el siglo XVIII (Estados Protestantes Alemanes y Dinamarca, 1700; Suiza, 1702; Inglaterra y sus colonias americanas, 1752). En Japón incorporan el año gregoriano y la regla de intercalación de bisiestos en el año 1783, aunque establecen el origen de la escala en el año 660 a.C. En el resto de los países comenzaría a ser aceptado en las primeras décadas del siglo XX (Albania y China, 1912; Bulgaria, 1916; Rusia, 1918; Rumania y Yugoslavia, 1919; Grecia, 1923), ante la necesidad internacional de una unificación cronológica.

6. FECHA JULIANA

Las sucesivas reformas del calendario civil utilizado de forma generalizada en occidente desde que prevalece el desarrollo cultural del mundo cristiano y su no correspondencia con los, a veces complejos,

sistemas empleados por otras culturas alejadas en el tiempo y en el espacio, inducen a José Scaliger en 1582, coincidiendo con la modificación introducida por Gregorio XIII, a proponer un método simple que facilitase la unificación de las diversas escalas. Consistía en contar de forma ininterrumpida los días solares medios, desde un origen arbitrario, con un período que fuera múltiplo de los períodos lunisolares fundamentales utilizados comúnmente en los calendarios y lo suficientemente amplio como para cubrir los eventos históricos desde la más remota antigüedad o, al menos, aquellos de los que en su época se tenía conocimiento.

Considera el período de repetición de los días de la semana (28 años), el ciclo de Metón (19 años) y el período de indicción romano (15 años). Obtiene, por simple multiplicación, una unidad primaria de 7980 años julianos (2914695 días solares medios), que denomina **"período juliano"** en honor de su padre. Establece el origen de este primer período, en el cual nos encontramos actualmente, en el mediodía medio de Greenwich del 1 de enero del año 4713 a.C. (-4712 enero 0 a 12^h de TU), estimando que en ese instante debió producirse la coincidencia de los tres ciclos considerados en la formación de su escala. De esta forma, la fecha juliana de un suceso coincide con el número de días transcurridos desde la época cero del período. Su determinación tiene la ventaja de que puede ser realizada mediante algoritmos elementales, sin más que tener en cuenta la "época cero" y el hecho de que en el calendario juliano eran bisiestos todos los años divisibles por cuatro, mientras que en el gregoriano son excluidos los bisiestos seculares no divisibles por 400.

Esta secuencia cronológica, no ha perdido su vigencia con el paso de los años, ya que facilita enormemente la ordenación temporal de sucesos. Se trata de una escala de uso preferentemente científico, prácticamente imprescindible cuando se trata de estudiar y analizar fenómenos de largo período. Asimismo, es sumamente valiosa para los historiadores que se enfrentan en sus dataciones con la falta de continuidad en el cómputo temporal, establecido, en ocasiones, de forma arbitraria en función de la política o la religión de los grandes imperios dominantes a lo largo de la historia de la humanidad.

En época reciente, con el objetivo de simplificar los cálculos en ciertas aplicaciones prácticas, se ha introducido el denominado **"día juliano modificado"**, que se obtiene restando 2400000.5 a la fecha

juliana ordinaria. De esta forma, se evita trabajar con siete cifras y desaparece la fracción 0.5, ligada al origen de la unidad elemental. Así, esta nueva escala se inicia a medianoche, como es usual en la vida ordinaria, coincidiendo con las cero horas de tiempo universal del día 17 de noviembre de 1858.

BIBLIOGRAFÍA

Aubert, M.E., Lull, V., Sanahuja, E., Folch, D.: *Orígenes del hombre y de la civilización*. Historia Universal, vol. 1. Planeta. Barcelona, 1992.

Barbieri, C., Barbon, R., Bertola, F., Brermann, M.C., Yu-Che Chang et al.: *El Universo*. Ed. Sarpe. Madrid, 1982.

Berry, A.: *A short history of Astronomy*. Dover. New York, 1961.

Biot, J.B.: *Études sur l'astronomie indienne et sur l'astronomie chinoise*. Albert Blanchard. Paris, 1969.

Caballos, A., Serrano, J.M.: *Sumer y Akkad*. Historia del Mundo Antiguo, vol 1. Akal. Madrid, 1988.

Cazelles, R., Longnon, J.: *Les Très Riches Heures du duc de Berry*. París, 1967.

Coyne, G.V., Hoskin, M.A., Pedersen, O. (Eds.): *Gregorian Reform of the Calendar*. Proc. of the Vatican Conference to Commemorate its 400th Anniversary 1582-1982. Specola Vaticana. Città del Vaticano, 1983.

Crombie, A.C.: *Historia de la Ciencia: de San Agustín a Galileo*. 2 vols. Alianza Univ. Madrid, 1974.

Danjon, A.: *Astronomie Générale*. Ed. Blanchard. París, 1980.

Delambre, M.: *Histoire de l'astronomie ancienne*. Vol. 2. Johnson Rep. Corp. New York, 1965.

Dicks, D.R.: *Early Greek Astronomy to Aristotle*. Thames and Hudson. Bristol, 1970.

Fontana, J., Ucelay-Da Cal, E.: *Nacimiento de los nuevos mundos*. Historia Universal, vol. 3. Planeta. Barcelona, 1992.

Garbers, K.: *La Matemática y la Astronomía en la Edad Media*. Instituto Jorge Juan. CSIC. Madrid, 1954.

Neugebauer, O.: *A history of ancient mathematical astronomy*. 3 vols. Springer-Verlag. Berlin, 1975.

Plácido, D., Folch, D., Ucelay-Da Cal, E.: *La antigüedad clásica*. Historia Universal, vol. 2. Planeta. Barcelona, 1992.

Taton, R. (Dir. Ed.): *Historia General de las Ciencias*. 5 vols. Destino. Barcelona, 1975.

Torroja, J.M.: *El Sistema del Mundo desde la antigüedad hasta Alfonso X el Sabio*. Instituto de España. Madrid, 1980.

Torroja, J.M.: *Historia de la ciencia árabe. Los sistemas astronómicos*. Instituto de Astronomía y Geodesia (CSIC-UCM), 122. Madrid, 1981.

Urruela, J.: *Egipto: Epoca Tinita e Imperio Antiguo*. Historia del Mundo Antiguo, vol. 2. Akal. Madrid, 1988.

Urruela, J.: *Egipto durante el Imperio Medio*. Historia del Mundo Antiguo, vol. 4. Akal. Madrid, 1991.

Vives, T.J.: *Astronomía de posición*. Alhambra. Madrid, 1971.

Wagner, C.G.: *Babilonia*. Historia del Mundo Antiguo, vol. 3. Akal. Madrid, 1988.

PUBLICACIONES DEL INSTITUTO DE ASTRONOMIA Y GEODESIA
DE LA UNIVERSIDAD COMPLUTENSE — MADRID

(Antes Seminario de Astronomía y Geodesia)

- 1.—Efemérides de 63 Asteroides para la oposición de 1950 (1949).
- 2.—E. PAJARES: Sobre el cálculo gráfico de valores medios (1949).
- 3.—J. PENSADO: Órbita del sistema visual σ^2 U Maj (1950).
- 4.—Efemérides de 79 Asteroides para la oposición de 1951 (1950).
- 5.—J. M. TORROJA: Corrección de la órbita del Asteroide 1395 "Aribeda" (1950).
- 6.—R. CARRASCO y J. M. TORROJA: Rectificación de la órbita del Asteroide 1371 "Resi" (1971).
- 7.—J. M. TORROJA y R. CARRASCO: Rectificación de la órbita del Asteroide 1560 (1942 XB) y efemérides para la oposición de 1951 (1951).
- 8.—M. L. SIEGRIST: Órbita provisional del sistema visual Σ 728-32 Orionis (1951).
- 9.—Efemérides de 79 Asteroides para la oposición de 1952 (1951).
- 10.—J. PENSADO: Órbita provisional de Σ 1883 (1951).
- 11.—M. L. SIEGRIST: Órbita provisional del sistema visual Σ 2052 (1952).
- 12.—Efemérides de 88 Asteroides para la oposición de 1953 (1952).
- 13.—J. PENSADO: Órbita de ADS 9380 = Σ 1879 (1952).
- 14.—F. ALCÁZAR: Aplicaciones del Radar a la Geodesia (1952).
- 15.—J. PENSADO: Órbita de ADS 11897 = Σ 2438 (1952).
- 16.—B. RODRÍGUEZ-SALINAS: Sobre varias formas de proceder en la determinación de períodos de las marcas y predicción de las mismas en un cierto lugar (1952).
- 17.—R. CARRASCO y M. PASCUAL: Rectificación de la órbita del Asteroide 1528 "Conrada" (1953).
- 18.—J. M. GONZÁLEZ-ABOIN: Órbita de ADS 1709 = Σ 228 (1953).
- 19.—J. BALTÁ: Recientes progresos en Radioastronomía. Radiación solar hiperfrecuente (1953).
- 20.—J. M. TORROJA y A. VÉLEZ: Corrección de la órbita del Asteroide 1452 (1938 DZ₁) (1953).
- 21.—J. M. TORROJA: Cálculo con Cracovianos (1953).
- 22.—S. AREND: Los polinomios ortogonales y su aplicación en la representación matemática de fenómenos experimentales (1953).
- 23.—J. M. TORROJA y V. BONGERA: Determinación de los instantes de los contactos en el eclipse total de Sol de 25 de febrero de 1952 en Cogo (Guinea Española) (1954).
- 24.—J. PENSADO: Órbita de la estrella doble Σ 2 (1954).
- 25.—J. M. TORROJA: Nueva órbita del Asteroide 1420 "Radcliffe" (1954).
- 26.—J. M. TORROJA: Nueva órbita del Asteroide 1557 (1942 AD) (1954).
- 27.—R. CARRASCO y M. L. SIEGRIST: Rectificación de la órbita del Asteroide 1290 "Albertine" (1954).
- 28.—J. PENSADO: Distribución de los períodos y excentricidades y relación período-excentricidad en las binarias visuales (1955).
- 29.—J. M. GONZÁLEZ-ABOIN: Nueva órbita del Asteroide 1372 "Haremari" (1955).
- 30.—M. DE PASCUAL: Rectificación de la órbita del Asteroide 1547 (1929 CZ) (1955).
- 31.—J. M. TORROJA: Órbita del Asteroide 1554 "Yugoslavia" (1955).
- 32.—J. PENSADO: Nueva órbita del Asteroide 1401 "Lavonne" (1956).
- 33.—J. M. TORROJA: Nuevos métodos astronómicos en el estudio de la figura de la Tierra (1956).
- 34.—D. CALVO: Rectificación de la órbita del Asteroide 1466 "Mündleira" (1956).
- 35.—M. L. SIEGRIST: Rectificación de la órbita del Asteroide 1238 "Predappia" (1956).

- 36.—J. PENSADO: Distribución de las inclinaciones y de los polos de las órbitas de las estrellas dobles visuales (1956).
- 37.—J. M. TORROJA y V. BONGERA: Resultados de la observación del eclipse total de Sol de 30 de junio de 1954 en Sydkoster (Suecia) (1957).
- 38.—ST. WIERZBINSKI: Solution des équations normales par l'algorithme des cracoviens (1958).
- 39.—J. M. GONZÁLEZ-ABOIN: Rectificación de la órbita del Asteroide 1192 "Prisma" (1958).
- 40.—M. LÓPEZ ARROYO: Sobre la distribución en longitud heliográfica de las manchas solares (1958).
- 41.—F. MÚGICA: Sobre la ecuación de Laplace (1958).
- 42.—F. MARTÍN ASÍN: Un estudio estadístico sobre las coordenadas de los vértices de la triangulación de primer orden española (1958).
- 43.—ST. WIERZBINSKI: Orbite améliorée de h 4530 = γ Cen = Cpd -48° , 4965 (1958).
- 44.—D. CALVO BARRENA: Rectificación de la órbita del Asteroide 1164 "Kobolda" (1958).
- 45.—M. LÓPEZ ARROYO: El ciclo largo de la actividad solar (1959).
- 46.—F. MÚGICA: Un nuevo método para la determinación de la latitud (1959).
- 47.—J. M. TORROJA: La observación del eclipse de 2 de octubre de 1959 desde El Aaiun (Sahara) (1960).
- 48.—J. M. TORROJA, P. JIMÉNEZ-LANDI y M. SOLÍS: Estudio de la polarización de la luz de la corona solar durante el eclipse total de Sol del día 2 de octubre de 1959 (1960).
- 49.—E. PAJARES: Sobre el mecanismo diferencial de un celóstato (1960).
- 50.—J. M. GONZÁLEZ-ABOIN: Sobre la diferencia entre los radios vectores del elipsoide internacional y el esferoide de nivel (1960).
- 51.—J. M. TORROJA: Resultado de las observaciones del paso de Mercurio por delante del disco solar del 7 de noviembre de 1960 efectuadas en los observatorios españoles (1961).
- 52.—F. MÚGICA: Determinación de la latitud por el método de los verticales simétricos (1961).
- 53.—M. LÓPEZ ARROYO: La evolución del área de las manchas solares (1962).
- 54.—F. MÚGICA: Determinación simultánea e independiente de la latitud y longitud mediante verticales simétricos (1962).
- 55.—P. DíEZ-PICAZO: Elementos de la órbita de la variable eclipsante V 499 Scorpionis (1964).
- 56.—J. M. TORROJA: Los Observatorios Astronómicos en la era espacial (1965).
- 57.—F. MARTÍN ASÍN: Nueva aportación al estudio de la red geodésica de primer orden española y su comparación con la red compensada del sistema europeo (1966).
- 58.—F. SÁNCHEZ MARTÍNEZ: La Luz Zodiacal. Luz del espacio interplanetario (1966).
- 59.—J. M. GONZÁLEZ-ABOIN: Variaciones de las coordenadas geodésicas de los vértices de una red, por cambio de elipsoide de referencia (1966).
- 60.—F. SÁNCHEZ MARTÍNEZ y R. DUMONT: Fotometría absoluta de la raya verde y del continuo atmosférico en el Observatorio Astronómico del Teide (Tenerife), de enero de 1964 a julio de 1965 (1967).
- 61.—M. REGO: Estudio del espectro de la estrella 31 Aql. en la región $\lambda\lambda$ 4000-6600 Å (1969).
- 62.—C. MACHÍN: Mareas terrestres (1969).
- 63.—J. M. TORROJA: La estación para la observación de satélites geodésicos de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Madrid (1969).
- 64.—M. J. SEVILLA: Reducción automática de posiciones de estrellas (1970).
- 65.—J. M. TORROJA: Memoria de las actividades del Seminario de Astronomía y Geodesia de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Madrid en 1969 (1970).
- 66.—M. J. SEVILLA: Los cálculos de estación en triangulación espacial (1970).
- 67.—MANUEL E. REGO: Determinación de las abundancias de los elementos en la atmósfera de la estrella de alta velocidad 31 Aql. (1970).
- 68.—M. J. FERNÁNDEZ-FIGUEROA: Análisis cualitativo del espectro de la estrella peculiar HD 18474 (1971).
- 69.—J. M. TORROJA: Memoria de las actividades del Seminario de Astronomía y Geodesia de la Universidad Complutense de Madrid en 1970 (1971).

- 70.—R. VIEIRA y R. ORTIZ: Descripción de un aparato para medida de coordenadas (1971).
- 71.—J. M. TORROJA: Memoria de las actividades del Seminario de Astronomía y Geodesia de la Universidad Complutense de Madrid en 1971 (1972).
- 72.—M. J. FERNÁNDEZ-FIGUEROA: Observación y estudio teórico del espectro de la estrella peculiar HD 18474 (1972).
- 73.—M. J. SEVILLA: Cálculo de las constantes de distorsión y parámetros del disco obturador para cámaras balísticas (1973).
- 74.—R. PARRA y M. J. SEVILLA: Cálculo de efemérides y previsiones de pasos de satélites geodésicos (1973).
- 75.—M. REGO y M. J. FERNÁNDEZ-FIGUEROA: Resultado de las observaciones de α Peg efectuadas desde el satélite europeo TDI (1973).
- 76.—E. SIMONNEAU: Problemas en la determinación de abundancias de elementos en las estrellas en condiciones de equilibrio termodinámico local y alejadas del equilibrio termodinámico local (1974).
- 77.—J. ARANDA: Construcción de modelos de estructura interna para estrellas en la secuencia principal inicial (1974).
- 78.—R. ORTIZ, M. J. SEVILLA y R. VIEIRA: Estudio de la calibración, técnica de medida y automatización de datos en un comparador para medidas de placas estelares (1974).
- 79.—M. J. SEVILLA: Método autocorrector para el cálculo de direcciones de satélites geodésicos y análisis de los errores en la restitución de un arco de órbita (1974).
- 80.—M. A. ACOSTA, R. ORTIZ y R. VIEIRA: Diseño y construcción de un fotómetro fotoeléctrico para la observación de ocultaciones de estrellas por la Luna (1974).
- 81.—T. J. VIVES, C. MORALES, J. GARCÍA-PELAYO y J. BARBERO: Fotometría fotográfica UBV del cúmulo galáctico King 19 (1974).
- 82.—R. ORTIZ y R. VIEIRA: Control automático en posición y tiempo de los sistemas de obturación de las cámaras de observación de satélites geodésicos (1974).
- 83.—J. M. TORROJA: Memoria de las actividades del Seminario de Astronomía y Geodesia de la Universidad Complutense de Madrid en 1972 y 1973 (1974).
- 84.—M. J. FERNÁNDEZ-FIGUEROA y M. REGO: α CrB en el ultravioleta lejano (1975).
- 85.—J. M. TORROJA, R. VIEIRA, R. ORTIZ y M. J. SEVILLA: Estudio de mareas terrestres en España (1975).
- 86.—M. J. SEVILLA y R. PARRA: Levantamiento gravimétrico de Lanzarote (1975).
- 87.—P. KUNDANMAL SUKHWANI: Modelos teóricos de curvas de luz. Su aplicación al sistema β Lyrae (1975).
- 88.—M. J. SEVILLA: Coordenadas astronómicas y geodésicas. Desviación relativa de la vertical (1975).
- 89.—C. TEJEDOR: Fotometría fotoeléctrica R. G. U. del cúmulo galáctico IC 2581 (1976).
- 90.—M. J. SEVILLA: Nuevos coeficientes para la reducción automática de posiciones de estrellas (1976).
- 91.—M. REGO: Técnicas observacionales en espectroscopía astrofísica (1976).
- 92.—M. J. SEVILLA: Determinación de la latitud por distancias cenitales de la polar, método de Littrow (1976).
- 93.—T. J. VIVES: Determinación fotométrica del tipo espectral de la componente desconocida de una estrella binaria eclipsante (1976).
- 94.—M. REGO y M. J. FERNÁNDEZ-FIGUEROA: Contraste y determinación por métodos astrofísicos de fuerzas de oscilador (1977).
- 95.—M. J. SEVILLA y R. CHUECA: Determinación de acimutes por observación de la Polar. Método micrométrico (1977).
- 96.—JOSÉ M. GARCÍA-PELAYO: Fotometría R G U en un campo del anticentro galáctico, cerca del NGC 581 (1977).
- 97.—JOSÉ M. GARCÍA-PELAYO: Datos fotométricos de 2.445 estrellas estudiadas en la región de Casiopea, entre los cúmulos abiertos Trumpler 1 y NGC 581 (1977).
- 98.—PREM K. SUKHWANI y RICARDO VIEIRA: Spectral Analysis of Earth Tides (1977).
- 99.—JOSÉ M. TORROJA y RICARDO VIEIRA: Earth Tides in Spain. Preliminary results (1977).
- 100.—PREM K. SUKHWANI y RICARDO VIEIRA: Three different methods for taking in account the gaps in spectral analysis of Earth Tides records (1978).

- 101.—R. VIEIRA: Mareas terrestres (1978).
- 102.—M. J. SEVILLA y A. NÚÑEZ: Determinación de la longitud por el método de Mayer. Programas de cálculo automático (1979).
- 103.—M. J. SEVILLA y A. NÚÑEZ: Determinación de la latitud por el método de Sterneck. Programas de cálculo automático (1979).
- 104.—M. J. SEVILLA: Determinación de la latitud y la longitud por el método de alturas iguales. Programas de cálculo automático (1979).
- 105.—P. K. SUKHWANI y A. GIMÉNEZ: Corrección de efectos atmosféricos para imágenes tomadas desde satélites Landsat (1979).
- 106.—M. J. SEVILLA: Inversión de Matrices Simétricas en el método de mínimos cuadrados (1979).
- 107.—A. GIMÉNEZ: Análisis de la curva de luz del sistema binario eclipsante S Velorum (1979).
- 108.—M. J. SEVILLA: Determinación del acimut de una referencia por observación de la estrella polar. Programa de cálculo automático (1979).
- 109.—M. J. SEVILLA: El sistema IAU (1976) de constantes astronómicas y su repercusión en la reducción de posiciones de estrellas (Primera parte) (1980).
- 110.—M. J. SEVILLA y R. PARRA: Determinación de la latitud por el método de Horrebow-Talcott. Programas de Cálculo Automático (1980).
- 111.—M. J. SEVILLA: Determinación de la latitud y la longitud por fotografías cenitales de estrellas (1980).
- 112.—R. VIEIRA y M. OREJANA: Comunicaciones presentadas en las XLI y XLII Jornadas del Grupo de Trabajo de Geodinámica del Consejo de Europa, Luxemburgo (1979-80).
- 113.—M. J. SEVILLA: Sobre un método de cálculo para la resolución de los problemas geodésicos directo e inverso (1981).
- 114.—R. VIEIRA, J. M. TORROJA, C. TORO, F. LAMBAS, M. OREJANA y P. K. SUKHWANI: Comunicaciones presentadas en el IX Symposium Internacional de Mareas Terrestres. Nueva York (1981).
- 115.—M. A. MONTULL, M. J. SEVILLA y A. GONZÁLEZ-CAMACHO: Aplicación de la V. L. B. I. al estudio del movimiento del Polo (1981).
- 116.—A. GONZÁLEZ-CAMACHO y M. J. SEVILLA: Algunas relaciones entre diferentes ejes que se consideran en la rotación de la Tierra (1981).
- 117.—R. VIEIRA, F. LAMBAS y E. GIMÉNEZ: Modificaciones realizadas en un gravímetro LaCoste Romberg mod. G para su utilización en registro continuo de la gravedad (1981).
- 118.—R. VIEIRA: La microrred de mareas gravimétricas del Sistema Central (1981).
- 119.—J. M. TORROJA y R. VIEIRA: Informe sobre el desarrollo del programa de investigación sobre mareas terrestres en el último bienio (1981).
- 120.—F. LAMBAS y R. VIEIRA: Descripción, estudio de la precisión y aplicaciones geodésicas y geofísicas de los nuevos niveles de lectura electrónica (1981).
- 121.—M. J. SEVILLA: Programación del método de la cuerda (1981).
- 122.—J. M. TORROJA: Historia de la Ciencia Árabe. Los Sistemas Astronómicos (1981).
- 123.—M. J. SEVILLA y R. VIEIRA: Comunicaciones presentadas en la Sesión Científica de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, celebrada el día 13 de enero de 1982 (1982).
- 124.—M. J. SEVILLA y P. ROMERO: Aplicación del método de colocación a la reducción de placas fotográficas de estrellas (1982).
- 125.—M. J. SEVILLA y A. G. CAMACHO: Deformación rotacional de una tierra elástica (1982).
- 126.—M. J. SEVILLA y P. ROMERO: Obtención de las medidas de la precisión en la determinación de la latitud y la longitud por fotografías cenitales de estrellas (1982).
- 127.—M. J. SEVILLA, A. G. CAMACHO y P. ROMERO: Comunicaciones presentadas en la IV Asamblea Nacional de Astronomía y Astrofísica, Santiago de Compostela (1983).
- 128.—M. J. SEVILLA: El sistema IAU (1976) de constantes astronómicas y su repercusión en la reducción de posiciones de estrellas (Segunda parte) (1983).
- 129.—M. J. SEVILLA: Geodesia por satélites y navegación (1983).
- 130.—L. GARCÍA ASENSIO, A. G. CAMACHO, P. ROMERO y M. J. SEVILLA: Comunicaciones presentadas en la V Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica (1983).

- 131.—M. J. SEVILLA: Anomalías de la gravedad basadas en el sistema geodésico de referencia 1980 (1983).
- 132.—J. M. TORROJA: Historia de la Física hasta el siglo XIX. La Mecánica Celeste (1983).
- 133.—A. G. CAMACHO y M. J. SEVILLA: The Molodensky Problem for an homogeneous liquid core (1984).
- 134.—J. M. TORROJA: La obra astronómica de Alfonso X El Sabio (1984).
- 135.—H. MORITZ: Sistemas de referencia en Geodesia (1984).
- 136.—H. MORITZ: Rotación de la Tierra (1984).
- 137.—A. G. CAMACHO y M. J. SEVILLA: Autofrecuencias del movimiento del Polo para un modelo de Tierra de tipo Jeffreys Molodensky (1984).
- 138.—J. M. TORROJA: Nuevas definiciones en el problema de la medida del tiempo (1984).
- 139.—M. J. SEVILLA: Astronomía Geodésica (1984).
- 140.—M. J. SEVILLA y M. D. MARTÍN: Diseño de una Microrred en la Caldera del Teide para el estudio de deformaciones de la corteza en la zona (1986).
- 141.—R. VIEIRA, C. DE TORO y V. ARAÑA: Estudio Microgravimétrico en la Caldera del Teide (1986).
- 142.—M. J. SEVILLA, M. D. MARTÍN y A. G. CAMACHO: Análisis de Datos y Compensación de la primera campaña de observaciones en la Caldera del Teide (1986).
- 143.—M. J. SEVILLA y P. ROMERO: Hamiltonian Formulation of the polar motion for an elastic earth's model (1986).
- 144.—P. ROMERO y M. J. SEVILLA: The Sasao-Okubo-Saito equations by Hamilton Theory. First Results (1986).
- 145.—R. VIEIRA, M. J. SEVILLA, A. G. CAMACHO y M. D. MARTÍN: Geodesia de precisión aplicada al control de movimientos y deformaciones en la Caldera del Teide (1986).
- 146.—R. VIEIRA, J. M. TORROJA, C. DE TORO, B. DUCARME, J. KAARIAINEN, E. MEGÍAS y J. FERNÁNDEZ: Comunicaciones presentadas en el X Symposium Internacional de Mareas Terrestres. Madrid, 1985 (1986).
- 147.—M. J. SEVILLA, A. G. CAMACHO y P. ROMERO: Comunicaciones presentadas en el X Symposium Internacional de Mareas Terrestres. Madrid, 1985 (1986).
- 148.—M. J. SEVILLA: Formulación de modelos matemáticos en la compensación de redes Geodésicas: III Curso de Geodesia Superior (1986).
- 149.—H. LINKWITZ: Compensación de grandes redes geodésicas: III Curso de Geodesia Superior (1986).
- 150.—H. HENNEBERG: Redes geodésicas de alta precisión: III Curso de Geodesia Superior (1986).
- 151.—M. J. SEVILLA: Cartografía Matemática (1986).
- 152.—P. ROMERO y M. J. SEVILLA: Tratamiento Canónico del problema de Poincare. Movimiento del Polo. (1986)
- 153.—A. G. CAMACHO y M. D. MARTÍN: Constreñimientos internos en la compensación de Estaciones. (1986)
- 154.—J. OTERO: An Approach to the Scalar Boundary Value Problem of Physical Geodesy by Means of Nash-Hörmander Theorem. (1987)
- 155.—M. J. SEVILLA: Introducción al Problema Clásico de Molodensky. (1987)
- 156.—F. SANSÓ: Problemas de Contorno de la Geodesia Física. (1987)
- 157.—M. J. SEVILLA: Colocación mínimos cuadrados. (1987)
- 158.—L. MUSSIO: Estrategias del Método de colocación. Ejemplos de aplicación. (1987)
- 159.—M. J. SEVILLA, P. MUÑOZ, J. VELASCO y P. ROMERO: Calibración de un Distanciómetro de infrarrojos en una Base Interferométrica (1987).
- 160.—A. RIUS, J. RODRÍGUEZ, M. J. SEVILLA, R. VIEIRA, J. FERNÁNDEZ, C. DE TORO, A. G. CAMACHO y V. ARAÑA: Comunicaciones presentadas en la Sesión Científica de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, celebrada el día 4 de mayo de 1988 (1988).
- 161.—R. VIEIRA, A. G. CAMACHO y C. DE TORO: Cálculo de la Corrección de Marea en la Península Ibérica (1988).

(continúa en la cuarta de cubierta)

- 162.—A. G. CAMACHO, R. VIEIRA, C. DE TORO y J. FERNÁNDEZ: Estudio Gravimétrico de la Caldera del Teide (1988).
- 163.—A. J. GIL, M. J. SEVILLA, G. RODRÍGUEZ y J. OTERO: Aplicaciones de la colocación y Estudios del Geoide (1988).
- 164.—R. VIEIRA, J. FERNÁNDEZ, C. DE TORO, A. G. CAMACHO y M. V. RUYMBEKE: Investigaciones Geodinámicas en la Isla de Lanzarote (1988).
- 165.—M. J. SEVILLA, P. ROMERO, A. NÚÑEZ y B. BADA: Compensaciones y resultados (1988).
- 166.—R. VIEIRA, C. DE TORO y A. G. CAMACHO: Investigaciones en mareas (1988).
- 167.—A. NÚÑEZ, M. J. SEVILLA y J. M. AGRIA: Determinación Astrogeodésica del Geoide en Portugal (1988).
- 168.—M. J. SEVILLA y P. ROMERO: Pre-Processing Geodetic Data of the Volcanic area of Teide to monitoring deformations (1988).
- 169.—M. J. SEVILLA y A. J. GIL: Fórmulas diferenciales para los problemas Geodésicos directo e inverso en el método de la cuerda (1988).
- 170.—Zd. SIMÓN, V. STANCHEV, C. DE TORO, A. P. VENEDIKOV y R. VIEIRA: Relation between earth tide observations and some other data (1988).
- 171.—J. OTERO: On the Global Solvability of the fixed gravimetric boundary value problem (1989).
- 172.—R. VIEIRA, J. FERNÁNDEZ, C. DE TORO y A. G. CAMACHO: Comunicaciones presentadas en el XI International Symposium on earth tides. Helsinki (1989).
- 173.—A. RIUS y C. JACOBS: Precise V.L.B.I. surveying at the Madrid DSCC (1989).
- 174.—J. OTERO y M. J. SEVILLA: Modelo matemático para el ajuste simultáneo mínimos cuadrados de un bloque fotogramétrico (1989).
- 175.—F. SACERDOTE: I Problemi sopradeterminati in Geodesia Fisica e Il Problema dell'Altimetria-Gravimetria (1989).
- 176.—M. J. SEVILLA: Soluciones progresivas en el método de Mínimos Cuadrados (1989).
- 177.—M. J. SEVILLA y P. ROMERO: Compensación de Redes de Nivelación Trigonométrica (1989).
- 178.—J. OTERO y M. J. SEVILLA: On the optimal choice of the standard parallels for a conformal conical projection (1990).
- 179.—R. VIEIRA, J. FERNÁNDEZ, M. VAN RUYMBEKE, A. G. CAMACHO, J. ARNOSO y C. TORO: Geodynamic Research in Lanzarote (Canary Islands) (1990).
- 180.—M. J. SEVILLA, A. GIL y P. ROMERO: Adjustment of the first order gravity net in the Iberian Peninsula (1990).
- 181.—R. VIEIRA, J. MAKINEN, A. G. CAMACHO y M. J. SEVILLA: Observaciones absolutas de la gravedad en España (1991).
- 182.—M. J. SEVILLA: Criterios de precisión cartográfica (1991).
- 183.—A. P. VENEDIKOV, R. VIEIRA y C. DE TORO: A new method for earth tide analysis (1992).
- 184.—M. J. SEVILLA: Mare Nostrum. Geomed Report-2 (1992).
- 185.—E. SARDON, A. RIUS y N. ZARRADA: GPS Ionospheric Delays (1993).
- 186.—M. J. SEVILLA: Teoría de Errores de observación (1993).
- 187.—C. DE TORO, A. P. VENEDIKOV y R. VIEIRA: A New Method for Earth Tide Data Analysis (1993).
- 188.—M. J. SEVILLA: Análisis de Observaciones Gravimétricas y Calculo de Anomalías (1994).
- 189.—A. P. VENEDIKOV, R. VIEIRA, C. DE TORO y J. ARNOSO: A New Program Developed in Madrid for Tidal Data Processing (1995).
- 190.—J. L. VALBUENA, M.^a DOLORES VARA, M.^a LUISA SORIANO, GUADALUPE RODRIGUEZ y M. J. SEVILLA: Instrumentación y Metodología empleadas en las Técnicas Altimétricas Clásicas (1996).
- 191.—JOSÉ FERNÁNDEZ, TING-TO YU, AND JOHN B. RUNDLE: Displacement and Gravity Changes due to Different Sources in Layered Media (1997).
- 192.—J. OTERO: Generalized Inverse Matrices and the Gauss-Markov Theorem (1998).
- 193.—MIGUEL J. SEVILLA DE LERMA: Introducción Histórica a la Geodesia (1999).